



DISEÑO ESTRUCTURAL Y AERODINÁMICO DE UN MONOPLAZA FORMULA SENA ECO

**JUAN CAMILO HERNÁNDEZ MARTÍN
JONATHAN CAMILO VELANDIA BAUTISTA**

Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de Ingeniería Aeronáutica y Mecánica
Bogotá, Colombia
2017

DISEÑO ESTRUCTURAL Y AERODINÁMICO DE UN MONOPLAZA FORMULA SENA ECO

JUAN CAMILO HERNÁNDEZ MARTÍN
Código: 201020059604

JONATHAN CAMILO VELANDIA BAUTISTA
Código: 201010058604

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Aeronáutico e Ingeniero Mecánico

Director:
Ing. John Jairo Vaca Rios

Línea de Investigación:
Análisis Aerodinámico y Estructural

Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de Ingeniería Aeronáutica y Mecánica
Bogotá, Colombia

2017

Este trabajo fue posible gracias a Dios que me dio esta grandiosa oportunidad, a mi mamá y a mi hermano con su apoyo permanente, y a todas esas personas que día a día dejaron en mí una enseñanza.

Jonathan Velandia B.

A mis padres quienes siempre estuvieron allí aun en los momentos más difíciles brindándome todo su amor y apoyo.

Juan Camilo Hernández

Agradecimientos

Damos gracias a Dios quien fue la luz que nos guió a lo largo de este camino, llenándonos de sabiduría y fe para afrontar los desafíos impuestos en la realización de este proyecto.

Agradecemos al SENA, en especial a las personas de la regional Arauca encabezadas por el ingeniero Gerson Mena Ardila, quienes decidieron contar con nuestro apoyo para realizar el diseño de este monoplaza y nos iniciaron en este trabajo de grado.

Agradecemos también al profesor Edison Hernando Paguatian Tutistar, quien nos brindó su ayuda con la redacción del anteproyecto y a nuestro director de grado John Jairo Vaca Rios quien nos guió para que este proyecto fuera posible.

Resumen

Con el siguiente proyecto se pretende dar unas recomendaciones de diseño para un monoplace formula SENA eco desde el punto de vista estructural y aerodinámico, donde se determina si el chasis es seguro o no estando sometido a una colisión frontal, lateral y superior. También se calcula el coeficiente de resistencia a dos alternativas de carrocerías, una con carenado en la rueda trasera el vehículo y otra sin carenado, para saber cuál tendrá un mayor rendimiento en pista.

La metodología usada para resolver estas incógnitas es mediante el uso de un software computacional, siguiendo la normativa de la formula SENA eco y la normativa EURO NCAP.

Los resultados demostraron que, para el caso del chasis estudiado se determinó que el diseño presentado en este proyecto cumple la normatividad vigente y se debe utilizar como mínimo un diámetro de tubería de 1-1/2 con una tensión de rotura igual o mayor a 375MPa.

Para el caso de la carrocería, el diseño a utilizar es sin carenado debido a que alcanza una mayor velocidad de punta, a pesar de presentar un mayor coeficiente de resistencia.

Palabras clave: (Chasis, Carrocería, Tensión de rotura, Coeficiente de arrastre, Elementos finitos).

Abstract

The following project is intended to give some design recommendations for a car SENA eco from a structural and aerodynamic point of view, where it is determined whether the chassis is safe or not subjected to a frontal, lateral and upper collision. The coefficient of resistance to two alternative bodies is also calculated.

One with fairing in the rear wheel the vehicle and another without fairing, to know which one will have a greater performance in track.

The methodology used to solve these unknowns is through the use of computer software, following the rules of the SENA eco formula and the EURO NCAP standard.

The results showed that, for the case of the chassis studied, it was determined that the design presented in this project complies with current regulations and at least one pipe diameter of 1-1 / 2 with a breaking voltage equal to or greater than 375MPa .

For the case of the body, the design to be used is that of without fairing because it reaches a higher tip speed, despite having a higher coefficient of resistance.

Keywords: (Chassis, Body, Breaking stress, Drag coefficient, Finite elements).

Contenido

	Pág.
Introducción	1
1. Antecedentes históricos	5
2. El chasis y la carrocería.....	7
3. Reglamento de la formula SENA eco	11
4. Criterios de diseño.....	15
5. Definiciones.....	21
6. Pruebas de choque	26
7. Simulación del chasis	31
8. Simulación de la carrocería	35
9. Pre-proceso Chasis.....	50
10. Pre-proceso carrocería	55
11. Post Procesamiento chasis.....	67
12. Resultados del chasis.....	71
13. Resultados carrocería.....	90
14. Análisis de los resultados	123
15. Conclusiones.....	131
16. Bibliografía	133

Lista de figuras

	Pág.
Figura: 2-1 Tipos y parte de un alerón. (Talay).....	9
Figura: 5-1 Compresibilidad (Delft University)	23
Figura: 7-1 Diagrama de caída de un cuerpo (Autores).....	33
Figura: 7-2 Diagrama Fuerza vs Desplazamiento (Autores)	33
Figura: 10-1 Condiciones de contorno (Autores)	58
Figura: 10-2 Modelo sin carenado (izquierda) y carenado con (derecha). (Autores)	60
Figura: 10-3 Elementos para la elaboración de la malla.....	61
Figura: 10-4 Método gráfico para la estimación del tamaño inicial	62
Figura: 10-5 Malla del dominio computacional. (Autores)	65
Figura: 10-6 Caja interna rodeando el vehículo con un refinamiento de los elementos. Se observan los prismas en el piso del dominio computacional. (Autores).....	65
Figura: 10-7 Capa de Prismas en la punta del monoplaza. (Autores).....	66
Figura: 12-1 Enmallado del chasis y la pared (Autores)	71
Figura: 12-2 Calidad del enmallado (Autores)	72
Figura: 12-3 Vista frontal antes del choque (Autores).....	72
Figura: 12-4 Vista frontal después del choque (Autores).....	73
Figura: 12-5 Vista superior antes del choque (Autores).....	73
Figura: 12-6 Vista superior después del choque (Autores)	74
Figura: 12-7 Grafico de energía (Autores).....	74
Figura: 12-8 Enmallado del chasis y la pared (Autores)	75
Figura: 12-9 Calidad del enmallado (Autores)	76
Figura: 12-10 Vista superior antes del choque (Autores).....	76
Figura: 12-11 Vista superior después del choque (Autores)	77
Figura: 12-12 Vista lateral antes del choque (Autores).....	77
Figura: 12-13 Vista lateral después del choque (Autores)	78
Figura: 12-14 Grafico de energía (Autores).....	78
Figura: 12-15 Enmallado del chasis y la esfera (Autores)	79
Figura: 12-16 Calidad del enmallado (Autores)	79
Figura: 12-17 Vista isométrica antes del choque (Autores)	80
Figura: 12-18 Vista isométrica después del choque (Autores).....	81
Figura: 12-19 Vista superior antes del choque (Autores).....	81
Figura: 12-20 Vista superior después del choque (Autores)	82
Figura: 12-21 Grafico de energía (Autores).....	82
Figura: 12-22 Enmallado del chasis y el suelo (Autores).....	83

Figura: 12-23 Calidad del enmallado (Autores).....	83
Figura: 12-24 Vista lateral antes del choque (Autores)	84
Figura: 12-25 Vista lateral después del choque (Autores)	84
Figura: 12-26 Grafico de energía (Autores)	85
Figura: 13-1 Cd vs No elementos para cada modelo (Autores)	91
Figura: 13-2 Coeficiente de arrastre. (Autores).....	92
Figura: 13-3 Coeficiente de sustentación (Autores)	93
Figura: 13-4 Residuos (Autores).....	92
Figura: 13-5 Vista lateral del contorno de presiones en el plano de simetría del monoplaza. (Autores)	93
Figura: 13-6 Vista isométrica del contorno de presiones en el plano de simetría del monoplaza. (Autores)	94
Figura: 13-7 Vista isométrica del contorno de distribución de presión estática. (Autores)	94
Figura: 13-8 Contornos de velocidad. (Autores)	95
Figura: 13-9 Contornos de velocidad. (Autores)	95
Figura: 13-10 Coeficiente de arrastre. (Autores).....	96
Figura: 13-11 Coeficiente de sustentación (Autores)	97
Figura: 13-12 Residuos (Autores).....	96
Figura: 13-13 Contorno de presión en el plano de simetría. (Autores).....	98
Figura: 13-14 Contornos de presión estática. (Autores).....	98
Figura: 13-15 Contornos de presión estática. (Autores).....	98
Figura: 13-16 Contornos de velocidad. (Autores)	99
Figura: 13-17 Contornos de velocidad. (Autores)	99
Figura: 13-18 Coeficiente de arrastre (Autores).....	100
Figura: 13-19 . Coeficiente de sustentación (Autores)	101
Figura: 13-20 Residuos (Autores).....	100
Figura: 13-21 Contorno de presión en el plano de simetría (Autores).....	101
Figura: 13-22 Contornos de presión estática. (Autores).....	102
Figura: 13-23 Contornos de presión estática. (Autores).....	102
Figura: 13-24 Contornos de velocidad. (Autores)	103
Figura: 13-25 Contornos de velocidad. (Autores)	103
Figura: 13-26 Coeficiente de arrastre (Autores).....	105
Figura: 13-27 Coeficiente de sustentación (Autores)	105
Figura: 13-28 Residuos (Autores).....	104
Figura: 13-29 Presión en el plano de simetría. (Autores).....	106
Figura: 13-30 Presión en el plano de simetría. (Autores).....	106
Figura: 13-31 Contornos de presión estática. (Autores).....	107
Figura: 13-32 Contornos de presión estática. (Autores).....	107
Figura: 13-33 Coeficiente de arrastre (Autores).....	110
Figura: 13-34 Coeficiente de sustentación (Autores)	110
Figura: 13-35 Residuos (Autores).....	109
Figura: 13-36 Presión en el plano de simetría. (Autores).....	111
Figura: 13-37 Presión en el plano de simetría. (Autores).....	111
Figura: 13-38 Contornos de presión estática. (Autores).....	112

Figura: 13-39 Contornos de presión estática. (Autores)	¡Error! Marcador no definido.
Figura: 13-40 . Contornos de velocidad. (Autores)	113
Figura: 13-41 Coeficiente de arrastre (Autores)	114
Figura: 13-42 Coeficiente de sustentación (Autores).....	115
Figura: 13-43 Residuos (Autores)	113
Figura: 13-44 Presión en el plano de simetría. (Autores)	115
Figura: 13-45 Presión en el plano de simetría. (Autores)	116
Figura: 13-46 Contornos de presión estática. (Autores)	116
Figura: 13-47 Contornos de presión estática. (Autores)	117
Figura: 13-48 Contornos de velocidad. (Autores)	117
Figura: 13-49 Coeficiente de arrastre (Autores)	119
Figura: 13-50 Coeficiente de sustentación (Autores).....	119
Figura: 13-51 Residuos (Autores)	118
Figura: 13-52 Contorno de presión en el plano de simetría. (Autores)	120
Figura: 13-53 Contorno de presión en el plano de simetría. (Autores)	120
Figura: 13-54 Contornos de presión estática. (Autores)	121
Figura: 13-55 Contornos de velocidad (Autores)	121
Figura: 13-56 Contornos de velocidad (Autores)	122
Figura: 14-1 Zonas de alta presión.....	124
Figura: 14-2 Punto de estancamiento en la parte delantera del monoplaza (izquierda) y zona de desprendimiento en la partes superior (derecha).....	125
Figura: 14-3 Distribución de presiones en la rueda trasera del vehículo.	126
Figura: 14-4 Estela de velocidad para el modelo sin carenados (superior) y con carenados (inferior).....	126

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1:Propiedades mecánicas del acero al carbón	15
Tabla 2 Masas utilizadas para la simulación.....	32
Tabla 3 Principales Modelos de turbulencia	42
Tabla 4 Dimensiones del monoplaza	60
Tabla 5 Dimensiones del dominio computacional	61
Tabla 6 Tamaño de la malla	63
Tabla 7 Skewness y calidad	64
Tabla 8 Resultados del enmallado.....	85
Tabla 9 Resultados de esfuerzo de tensión en el chasis	86
Tabla 10 Resultados en forma de energías	86
Tabla 11 Comparación de la energía cinética teórica vs simulada	87
Tabla 12 Tensiones promedio en el chasis.....	87
Tabla 13 Factor de seguridad.....	88
Tabla 14:Propiedades mecánicas del acero al carbón (Bhaskaran, s.f.).....	89
Tabla 15 Resultados y tiempo empleado para cada malla.....	91
Tabla 18 Masa del carro con carrocería en fibra de vidrio	128
Tabla 19 Masa del carro con carrocería en fibra de carbono	128
Tabla 20 Datos iniciales	129
Tabla 21 Resultados de la velocidad	130

Introducción

Planteamiento del problema

Desde sus inicios las competencias de los automóviles tuvieron un diseño que no satisfacía la seguridad a los pilotos en caso de accidentes, debido a esto se reglamentó por medio de la FIA (Federación Internacional del Automóvil) en 1950 la seguridad en competencias.

La aerodinámica en tales vehículos no fue prioridad hasta 1967 cuando el Lotus 49¹ introdujo este nuevo concepto al diseño del monoplaça. Actualmente estos dos temas son pieza clave en el diseño de un monoplaça ya que el chasis debe tener un análisis detallado para determinar si este ofrece seguridad al piloto.

En Colombia existe una iniciativa del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) para diseñar y construir monoplaças eléctricos, con el fin de impulsar el desarrollo de competencias automovilísticas. Estos monoplaças son diseñados con el propósito de cumplir las normativas de la Formula SENA eco 2015.

A pesar de que estos vehículos son eléctricos alcanzan velocidades mayores a 80 km/h² lo cual implica un riesgo de seguridad para el piloto, ya que pueden chocar contra los muros de contención de la pista o contra los demás coches generando que el chasis absorba toda la fuerza del choque y sea la única manera de salvaguardar la vida del piloto. Además, por su velocidad las llantas generan fuerza de arrastre³, que disminuyen el rendimiento del monoplaça en competencia, por lo tanto, surge la siguiente pregunta:

¹ TREMAYNE David. The science of Formula 1 Design. J H Haynes & Amp Co Ltd.

² <http://www.coc.org.co/all-news/formula-sena-eco-se-corre-en-narino-este-sabado-14-de-noviembre>.

³ KATS Joseph. Race cars aerodynamics design for speed. p.196.

¿Cuál diseño estructural de un chasis tubular aportara la mayor seguridad al piloto en caso de colisión y cuáles serían las consecuencias si se implementan elementos aerodinámicos que reduzcan la resistencia del aire en las llantas de un monoplaza formula SENA eco?

Justificación

Se hace la investigación en dos áreas de la ingeniería, la estructural y la aerodinámica ya que son parámetros esenciales que se pueden modificar en este tipo de vehículos.

En el área estructural se pretende diseñar el chasis como elemento de seguridad para el piloto ya que este lo protegerá en caso de accidente, y desde el área de la aerodinámica se quiere contribuir con la demostración de si es necesario o no, la utilización de elementos aerodinámicos que reduzcan la resistencia del aire en las llantas para este tipo de vehículo.

Los aportes al finalizar esta investigación serán los datos, pruebas, simulaciones y un diseño que le puede servir a cualquier escudería de la formula SENA eco para que el monoplace sea construido, o como una línea base para mejorar este diseño.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar aerodinámica y estructuralmente un monoplaza para competencias en la formula SENA ECO mediante cálculos analíticos y computacionales.

Objetivos Específicos

- Calcular las tensiones máximas del chasis en caso de una colisión frontal, lateral y superior mediante un software FEA.
- Diseñar aerodinámicamente dos carrocerías para proponer la de mayor eficiencia en competencia.
- Calcular los parámetros aerodinámicos del vehículo mediante un software de dinámica de fluidos computacional.

1. Antecedentes históricos

Desde la década de 1770, cuando Nicholas Cugnot instaló y adaptó un motor de vapor y dos cilindros a un simple carruaje, las carrocerías han experimentado una evolución constante, pasando de las primitivas estructuras de madera a las carrocerías auto portantes más modernas.⁴

1.1 Breve historia del chasis y la aerodinámica en carros de competición

1923 - La historia de las competiciones datan oficialmente en el Gran Prix Europeo en la ciudad de Monza Italia⁵, donde el chasis y la carrocería debieron sus diseños más a la ingeniería de construcción de puentes, lo cual significa que este tipo de diseños solamente eran rígidos cuando eran sometidos a flexión.⁶

1934 - Las escuderías Auto Unión Racing Cars, y Mercedes Benz realizan un salto evolutivo en los diseños de carros de competencia, pasando de un chasis de un solo tubo a uno de doble tubo en paralelo, y sus carrocerías pasaron de robustas piezas en madera a laminas que forraban los componentes del vehículo.

1950 - A falta de rigidez en los vehículos, los diseños fueron apuntando a tubos con diámetros menores y con mayor resistencia, construyéndose la carrocería en forma de

⁴ Revista técnica de reparación y peritación de daños en carrocería y pintura de automóviles. centro de experimentación y seguridad vial, p10.

⁵ <http://www.teamdan.com/archive/gen/1923.html>.

⁶ COSTIN Michael & PHIPPS David. Racing and sports cars chassis design. p.5.

cercha y con formas triangulares, los pioneros en estos tipos de diseños fueron el Lotus Mark Six y el Mercedes Benz 300SL.

1962 - Aparece por primera vez el término mono-casco con el Lotus 25, en donde el chasis y el cuerpo del vehículo formarían un solo componente, generando una mejora en la rigidez del vehículo en comparación a los de tipo Space Frame.

1967 - En el diseño del Lotus 49C se usan apéndices aerodinámicos llamados alerones, los cuales mejoran el agarre en pista y se vuelven un referente en los diseños posteriores.

1978 - El equipo Lotus demuestra una vez más que la aerodinámica juega un papel fundamental en los carros, utiliza el principio del efecto suelo para mejorar el agarre en las curvas mediante la implementación de unos faldones laterales en su vehículo el Lotus 78.

1990 - Se implementan el chasis mono-casco de fibra de carbono, lo que genera un descenso sustancial en el peso de los monoplaza.

2.El chasis y la carrocería

2.1 El chasis

El chasis es la estructura que da rigidez y soporta todas las cargas de torsión y la flexión ya sean dinámicas o estáticas; este tiene como objetivo principal unir las cuatro ruedas y servir como el anclaje de la carrocería.

2.1.1 Tipos de chasis

Debido a su construcción y/o diseño, los podemos dividir en cuatro grandes grupos:

- **Chasis Tipo Escalera:** El chasis de escalera es el más antiguo. Su diseño es básico, entre sus ventajas es la facilidad de producción en serie. La mayor desventaja es que hay poca profundidad a la estructura general dándole un centro de gravedad muy bajo. La mayoría de los autos clásicos, camionetas y vehículos grandes se hacen con este tipo de chasis.
- **Chasis Tipo mono-casco:** Los chasis mono-casco son hoy en día los que más se utilizan. Esta es una estructura bastante rígida que de fácil producción en masa y proporciona una gran estabilidad en caso de un accidente. La mayor desventaja este chasis es su peso. A pesar de que son fáciles de fabricar, no es rentable para su fabricación en pequeñas cantidades.
- **Chasis Tipo espacial tubular:** El proceso de fabricación del chasis espacial tubular es costoso, debido a la complejidad de su diseño y fabricación. Estos son los preferidos para autos de competencia debido a su alta estabilidad.

- El chasis columna vertebral: Este tipo de estructura fue inventada por Colín Chapman. Él utilizó una armadura en forma de columna vertebral para conectar el eje delantero al trasero. La columna vertebral proporciona la estructura para todos los componentes de trabajo del vehículo. Como desventaja, son muy pesados para ser usados en autos deportivos y demasiado caros para ser producidos en masa.

2.2 La carrocería

La carrocería es un conjunto de elementos que cubren parcial o totalmente el chasis y los componentes internos, su principal función es obtener un bajo coeficiente de resistencia aerodinámica mediante la maleabilidad del material que la constituye, además aporta belleza estética al monoplaça.

2.2.1 Tipos de carrocerías

Existen diferentes tipos de carrocería que permiten obtener dicha funcionalidad las cuales son:

- Carrocería y chasis separado: El principio consiste en unir el chasis con la carrocería, esta se debe fabricar dependiendo el tamaño, tipo y forma del chasis, generalmente se construyen en fibra⁷.
- Carrocería con plataforma chasis: Este tipo de carrocería es muy similar al anterior expuesto, la diferencia principal consiste en ser más resistente ya que es soldada a la estructura pues se fabrica en chapa metálica.
- Carrocería auto-portante: Esta surge de la combinación del chasis y la carrocería en el proceso de fabricación, usualmente las chapas son de distintos espesores dependiendo de la ubicación y los esfuerzos que deba soportar los elementos.

⁷ Elementos estructurales del vehículo, p. 56

2.2.2 Elementos aerodinámicos

Son elementos que suavizan las líneas de corriente del flujo y mejoran el rendimiento del vehículo generando carga y agarre, generalmente se usan en vehículos deportivos, pueden ser removibles y su desventaja es el aumento de resistencia aerodinámica y aumento de peso en el vehículo, podemos encontrar en vehículos de competencia los siguientes:

- **Difusor:** Sección divergente de un tubo Venturi situado bajo el vehículo en la parte trasera. Su objetivo es enviar el flujo proveniente del fondo a la zona de baja presión de la estela. Posee un volumen expandible que se llena cuando el vehículo se pone en marcha, el aire se acelera en la garganta Venturi disminuyendo la presión antes de entrar al difusor y volviendo así a la velocidad ambiente en la que se une con la estela.
- **Alerón:** Un alerón es un perfil aerodinámico que mediante su geometría y ángulo de ataque es capaz de generar sustentación o agarre.⁸

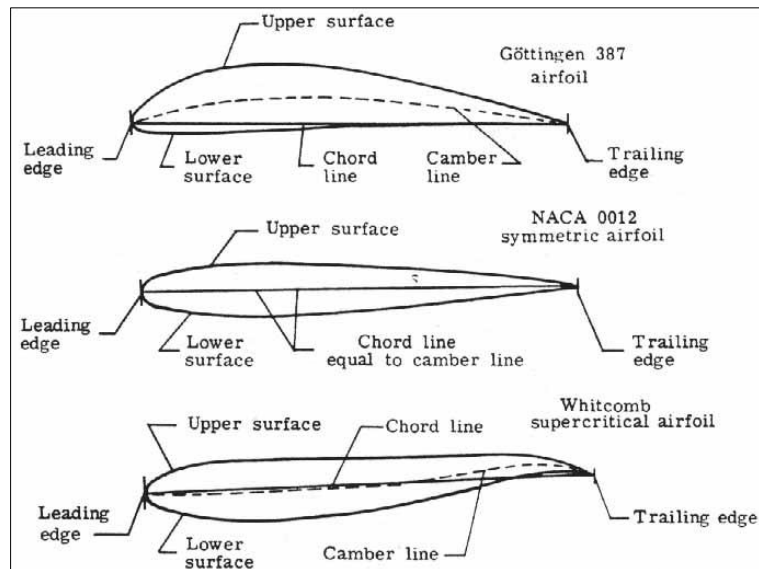


Figura: 2-1 Tipos y parte de un alerón. (Talay)

⁸ Talay, Introduction to the aerodynamics of flight, Pag 69.

Pontones: La función de un pontón es canalizar el flujo de aire hacia el interior del motor, radiador y/o baterías, permitiendo la correcta refrigeración mediante convección forzada.

Carenados: Son superficies que revisten una parte específica del monoplaaza disminuyendo la resistencia al avance. Generalmente cubren las ruedas de forma total o parcial dependiendo la categoría y tipo de vehículo.

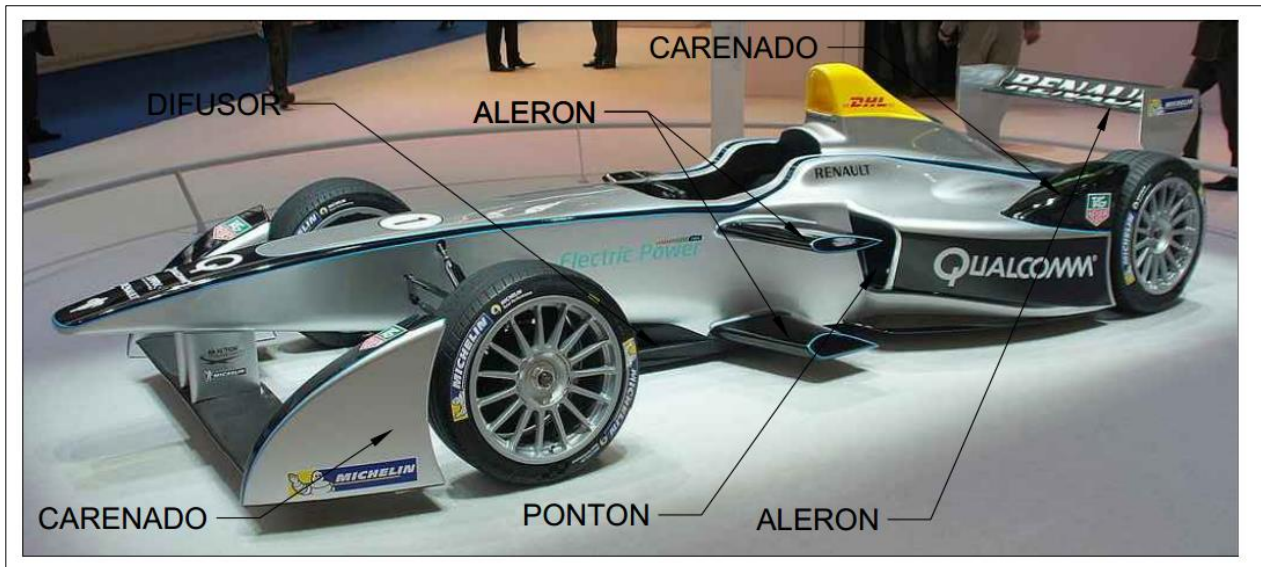


Figura 2-1: Elementos aerodinámicos (Smokeonthewater)

3.Reglamento de la formula SENA eco

Es el único proyecto en Colombia de esta magnitud que le apuesta a la creación e innovación por parte de los jóvenes colombianos.⁹

3.1 Especificaciones generales de la organización

La organización de la formula SENA eco mediante el reglamento técnico 2015 V1.3, determinara las normas claras para cada escudería que desee participar en la competencia.

Entre las principales generalidades que se encuentra en el reglamento son las siguientes:

- El vehículo debe tener cuatro ruedas, dos delanteras y dos traseras.
- La distancia entre ejes mínima es de 2000 mm
- El ancho máximo del vehículo es de 2000 mm
- Se deben instalar dos espejos retrovisores, uno en cada lado del vehículo, con una superficie mínima de 10000 mm^2 cada uno.
- La(s) batería(s) se deberá(n) encontrar por fuera del habitáculo del piloto
- Las llantas deberán ser de calle, 185/55/R15 con labrado de alto desempeño.
- Los rines deberán tener un diámetro de 15".
- La suspensión debe ser de doble tijera (brazo superior y brazo inferior).
- La altura mínima entre el suelo del vehículo y la pista es de 50mm.

⁹ MEJIA Germán, Jurado de la Fórmula Sena Eco, Diario la República, Edición 13 de abril de 2015.

3.2 Normatividad enfocada al chasis

El chasis es de libre configuración y diseño, debe presentar una jaula de seguridad que debe tener los elementos presentados en la figura 3-1

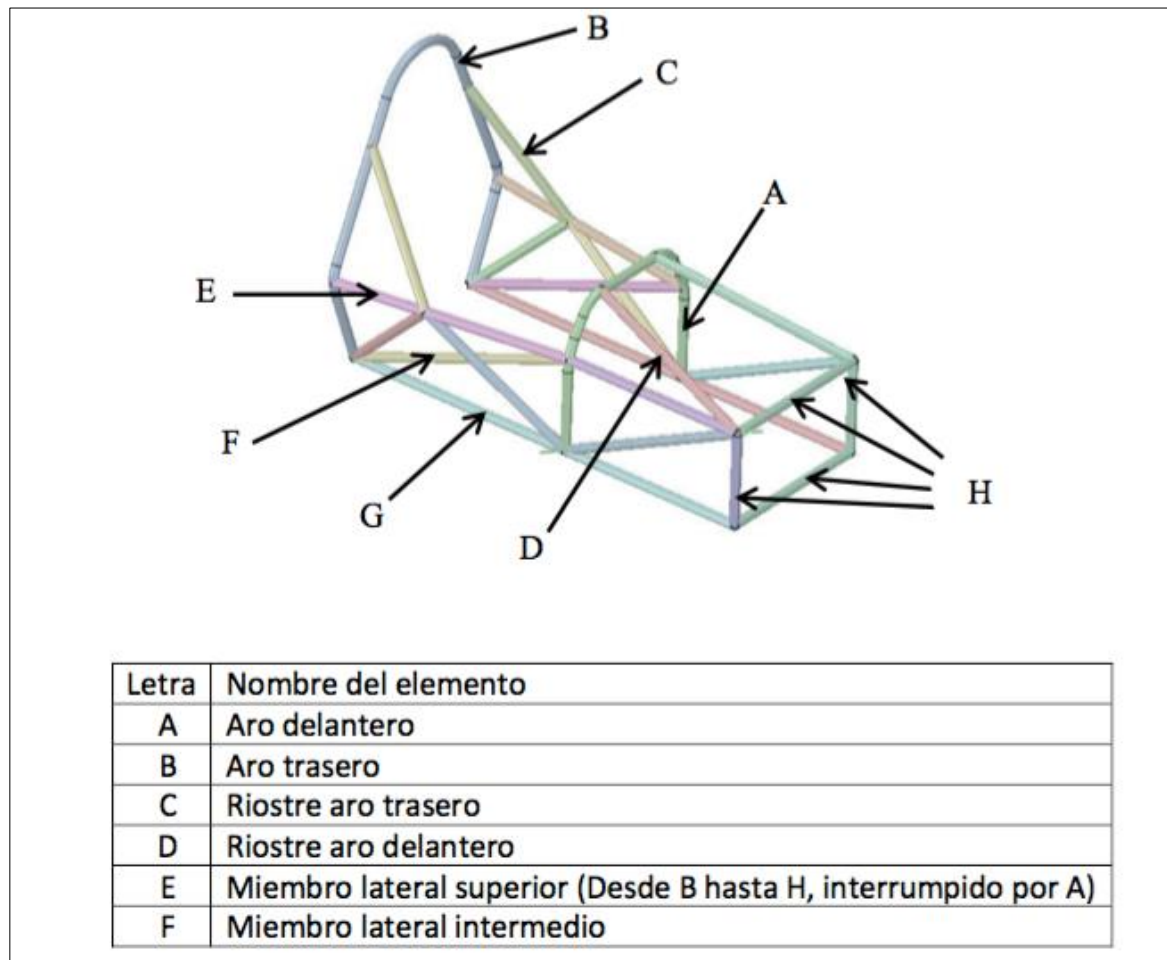


Figura 3-1:Elementos de la jaula antivuelco (SENA)

- La jaula antivuelco tiene como objetivo proteger al piloto en caso de volcadura, impacto con una barrera de seguridad u otro vehículo.
- El diseño de la jaula antivuelco deberá impedir el ingreso del motor al compartimiento del piloto.
- Todos los elementos de la jaula antivuelco se deberán fabricar en tubería de acero, de acuerdo con las siguientes especificaciones.
- Diámetro de la tubería 1-1/2", con espesor mínimo de 1.9 mm (calibre 14).

- El uso del material se restringe a un acero entre el siguiente rango: AISI SAE 1008-1020 (En este rango se encuentra la tubería comúnmente conocida como tubería estructural, tubería de mueble, entre otras).
- Si las características de la tubería presentan un mayor diámetro y un mayor espesor a las mencionadas en el cuadro, la tubería es permitida.

3.3 Normatividad enfocada a la carrocería

- La carrocería debe ser de tipo formula (con las ruedas descubiertas).
- La carrocería deberá cubrir el vehículo en su totalidad desde la parte delantera hasta la parte trasera, observado desde cualquier vista, exceptuando las entradas de aire y pequeñas aberturas que permitan la salida de los brazos de suspensión.
- El material de la carrocería es libre.
- El alerón trasero debe de estar por debajo de la parte más alta de la jaula antivuelco.
- Todos los componentes aerodinámicos deben estar anclados rígidamente al chasis.
- Los perfiles de ala utilizados para los alerones deben estar dentro de los perfiles NACA de 4 dígitos.
- Las ruedas delanteras y traseras podrán estar cubiertas por algún elemento aerodinámico para ayudar a disminuir el arrastre. Estos elementos (para las 4 ruedas) No podrán cubrir más del 50 % de la rueda en vista superior como lo muestra la figura 3-2.
- La integridad del habitáculo del piloto desde los pies hasta la parte de atrás de su espalda debe ir protegida por una célula de supervivencia. Esta célula debe evitar el ingreso de elementos que puedan herir al piloto. Puede ser en materiales compuestos o metales con un espesor mínimo de 2mm, se prohíbe el uso de materiales espumados y de poca rigidez.



Figura 3-2: Formas autorizadas de cubrir las ruedas. (SENA)

4. Criterios de diseño

4.1 Diseño de un chasis tubular

4.1.1 Material

Teniendo en cuenta el material que se necesita según el reglamento de la formula SENA eco, nos encontramos con las siguientes opciones.

AISI/SAE	TENSION DE ROTURA (MPa)	FLUENCIA (MPa)
1008	340	285
1010	365	305
1012	370	310
1015	385	325
1016	420	350
1017	405	340
1018	440	370
1019	455	379
1020	420	350

Tabla 1 Propiedades mecánicas del acero al carbón

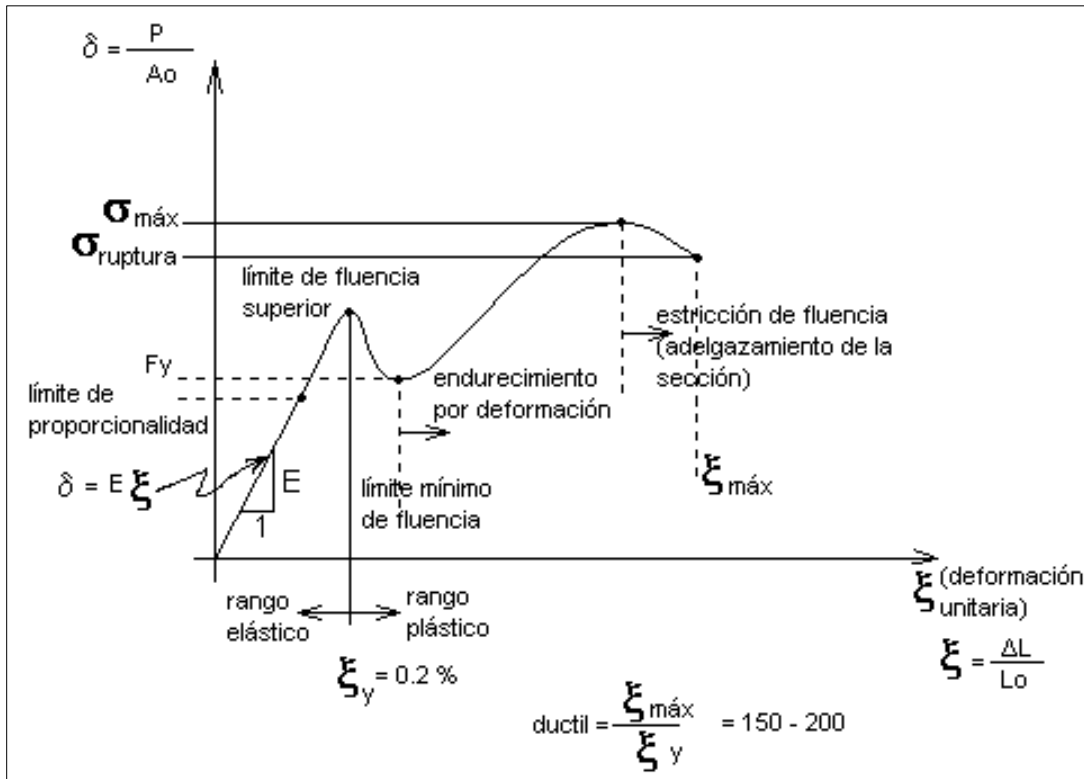


Figura 4-1 Diagrama Tensión Vs Deformación. (Carrera)

4.1.2 Tubería

La tubería de acuerdo a la reglamentación debe ser de diámetro 1-1/2" y con espesor mínimo de 1.9 mm (calibre 14), en el mercado¹⁰ la que más se aproxima a las especificaciones del reglamento es la de referencia Schedule 10 con espesor de 2.77mm.

¹⁰ <http://www.diametral.com.ar/tablas-dimensiones-y-peso-del-tubo-con-y-sin-costura-segun-norma-astm/>

4.1.3 Espacio

El tamaño del chasis se diseñó de acuerdo al tamaño del piloto, el motor, las baterías y los controladores.

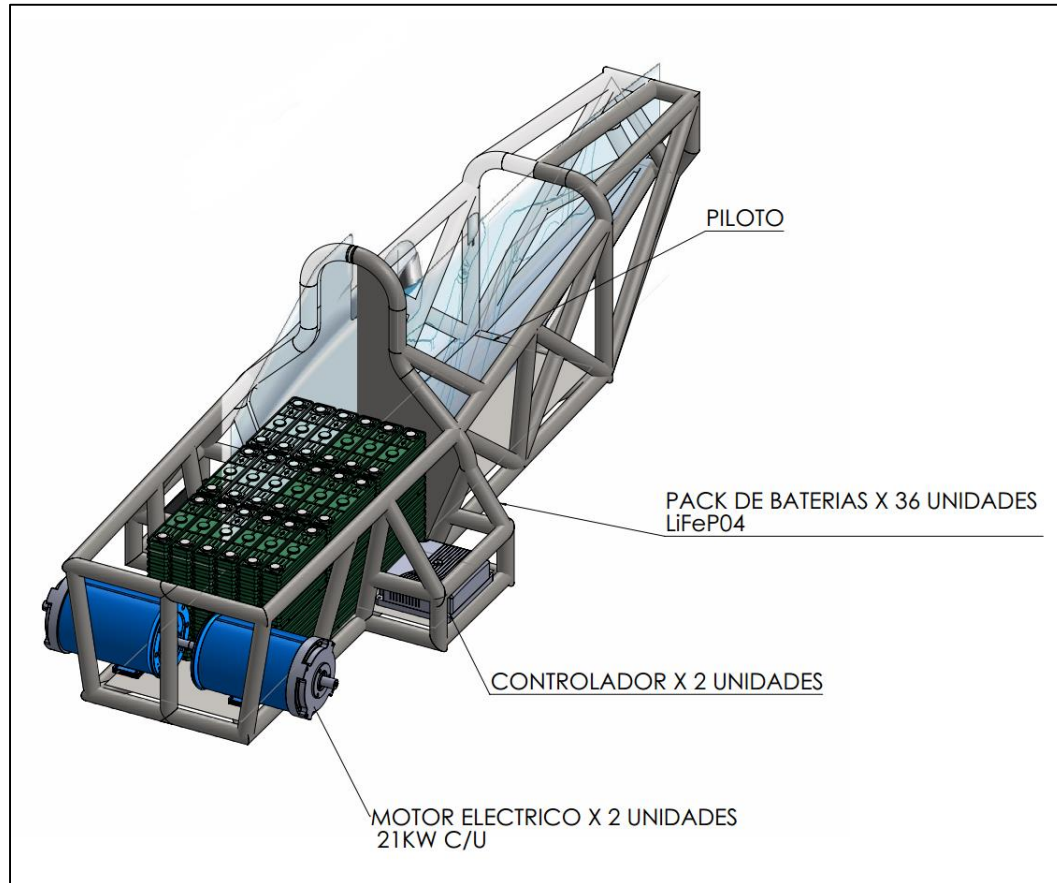


Figura 4-2 Distribución de los componentes dentro del chasis (Autores)

Para el caso del piloto se sigue la especificación de la organización la cual consiste en acomodar a un hombre percentil 95¹¹ o a una mujer percentil 5, además de este dato también se analizó la estatura promedio de los hombres colombianos, la cual es de aproximadamente 1720 mm¹².

¹¹ En el apéndice 1 del reglamento de la formula Sena eco, la estatura máxima para un hombre percentil 95 es de 1900 mm y mujer percentil 5 es de 1489 mm.

¹² <http://www.eltiempo.com/colombia/cali/estudio-sobre-estatura-en-colombia/16585488>

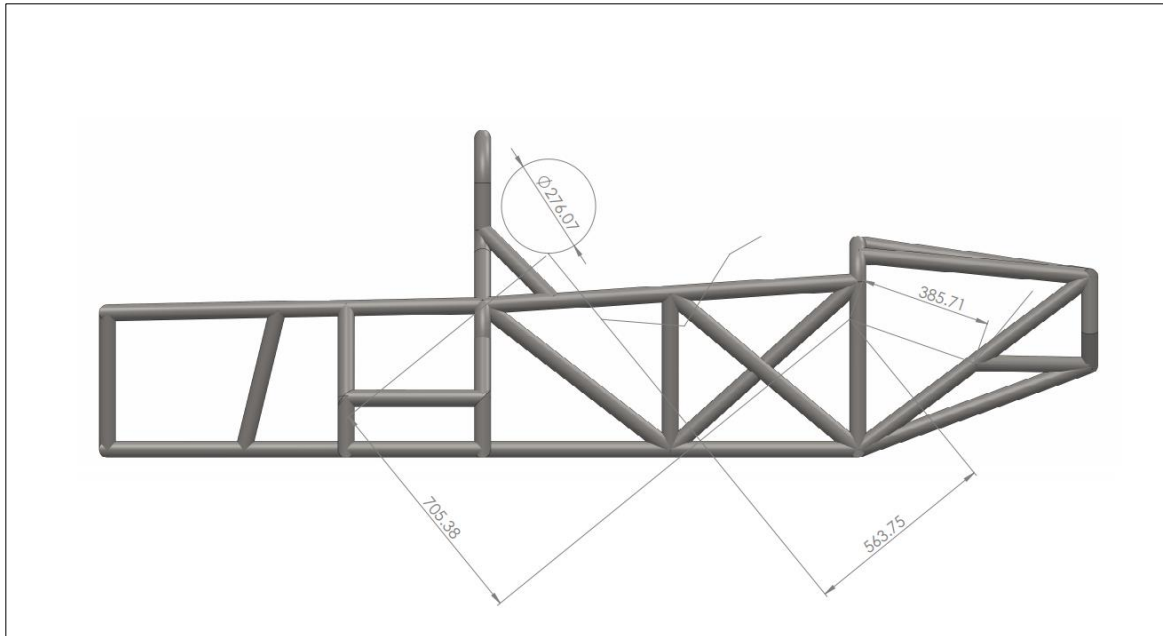


Figura 4-3 Ubicación del piloto percentil 95. (Autores)

El piloto debe estar en una posición ergonómica y se deberá facilitar el área de visión. Para pilotos de talla más baja (mujeres percentil 5) se modificaría la silla, los pedales y el manubrio.

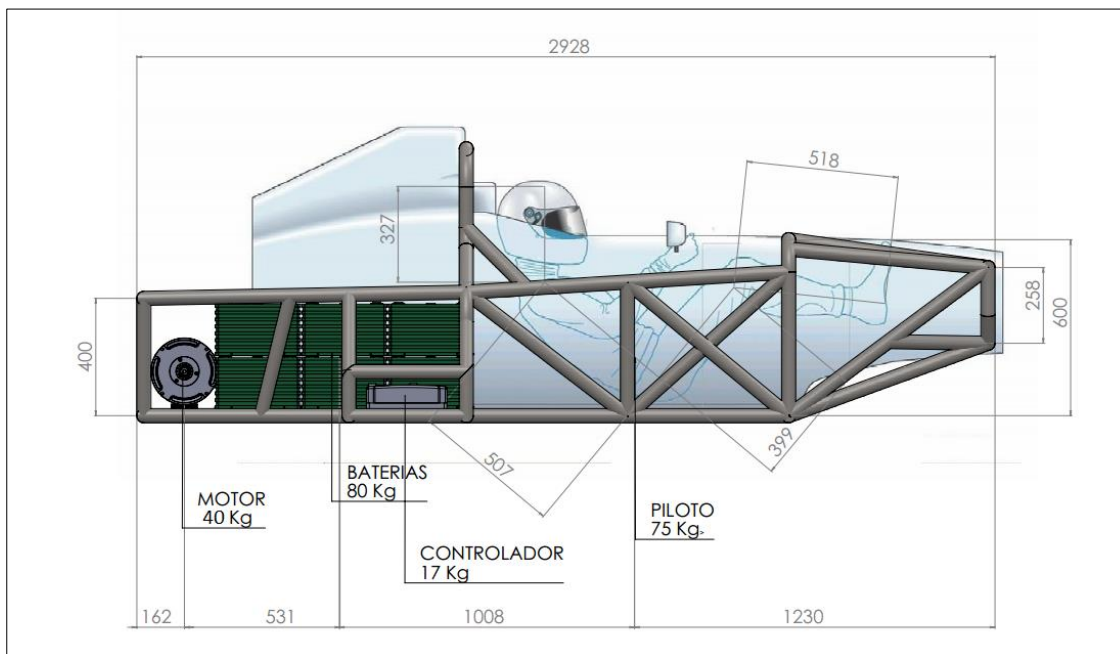


Figura 4-4 Ergonomía del piloto. (Autores)

4.2 Diseño de una carrocería formula SENA eco

4.2.1 Materiales recomendados

Para la fabricación de la carrocería se necesita un material que posea propiedades mecánicas adecuadas para la competencia. Entre los materiales recomendados por el Reglamento Técnico del SENA eco podemos encontrar los materiales compuestos, que resultan de la combinación de dos materiales químicamente diferentes y al ser unidos muestran las mejores propiedades de cada uno. A diferencia de los metales los compuestos son materiales anisotrópicos, generalmente responden de forma diferente cuando son sometidos a un esfuerzo según la dirección. Esta propiedad los hace superiores en fuerza, rigidez y peso.

Como materiales compuestos encontramos la fibra de vidrio y la fibra de carbono. En el caso de la primera, se deforma 4 veces más que la fibra de carbono al poseer menor rigidez, su densidad es de $2,54 \text{ g/cm}^3$ lo que la hace más pesada y económica. La fibra de carbono posee un módulo de elasticidad de 294 Gpa que la hace muy rígida, aunque menos flexible, su densidad es de $1,81 \text{ g/cm}^3$ que la hace mucho más liviana que la fibra de vidrio, su desventaja principal es su alto costo que resulta hasta 10 veces más que el de la fibra de vidrio.

En aplicaciones aeronáuticas y automotrices la fibra de vidrio es altamente utilizada¹³ por motivos de maleabilidad y de peso se recomiendan estas dos fibras para usarlas en la fabricación de la carrocería del monoplaça de la formula SENA Eco.

4.2.2 Tamaño

La carrocería debe ser calculada, diseñada y fabricada teniendo en cuenta las medidas del bastidor para su ajuste. También se debe tener en cuenta la punta anti-impacto que está ubicada en la parte delantera del chasis la cual busca absorber el impacto y desacelerar el vehículo en caso de un choque. Este elemento debe tener más de 52 centímetros de largo¹⁴. La carrocería en la parte delantera debe cubrir la punta anti-impacto de forma tal que la aerodinámica del vehículo completo no se vea perjudicada, se diseña en forma de

¹³ OLIVARES Santiago, GALÁN Marín, FERNANDEZ Roa. Los Composites, características y aplicaciones en la edificación, p.52.

¹⁴ Reglamento técnico formula SENA eco 2015 V1.3 p.21.

cono para que el avance a través del fluido sea suave tomando como ejemplo las utilizadas en la formula SAE dándole estética y mejorando el rendimiento.

5. Definiciones

5.1 Hipótesis Preliminar

Siendo el aire un gas que hace parte de los fluidos, formado por moléculas que no están en contacto inmediato, en el desarrollo del presente anteproyecto se modelara como una sustancia continua, es decir un medio continuo debido a su bajo número de Knudsen ($Kn \ll 1$). También se tomará el fluido de forma incompresible, esto corroborado como se explica más adelante por la ecuación del número MACH.

5.2 Marco de referencia

En el análisis de fluidos se tienen en cuenta dos marcos de referencia:

- Marco de referencia Lagrangiano: Se mueve con el fluido deformándose. Sigue las partículas del campo de flujo de forma individual y depende del tiempo. Así, En un tiempo t_0 la partícula P estará ubicada en (x_0, y_0, z_0) . Se puede decir que:

$$V_p(t_0) = \vec{V}_0$$

$$x_p(t_0) = x_0$$

$$y_p(t_0) = y_0$$

$$z_p(t_0) = z_0$$

Siendo V_p la velocidad de la partícula y x_p, y_p, z_p las componentes espaciales para el caso 3D. Su uso en mecánica de fluidos es limitado debido a la imposibilidad de seguir un número infinito de partículas debido a la imposibilidad de seguir un número infinito de partículas.

- Marco de referencia Euleriano: Este fijo en el espacio, en lugar de seguir las partículas individualmente se toma el fluido como un todo y se vigilan puntos en el espacio. No depende del tiempo y es ampliamente utilizado en mecánica de fluidos.

5.3 Propiedades del fluido

5.3.1 Densidad

$$\frac{m}{v} \approx \rho = \lim_{\delta v \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta v}$$

Ecuación 1 Densidad (White)

Se podría considerar un elemento infinitesimal de volumen en un instante de tiempo y contar su número de moléculas. La densidad sería el número de moléculas multiplicada por la masa molecular de una molécula y finalmente dividida por el volumen.

La densidad es un campo escalar variando en el espacio y posiblemente también en el tiempo.

$$\rho(x, y, z, t)$$

5.3.2 Temperatura

Medida promedio de la energía cinética de las partículas en un gas¹⁵.

5.3.3 Viscosidad

Tendencia de un fluido a resistir el deslizamiento entre capas, es la tasa de cambio del esfuerzo cortante.¹⁶

5.4 Parámetros adimensionales

Se utilizan en el estudio dimensional y de similitud. Se tienen:

5.4.1 Velocidad del sonido

Velocidad de propagación de las ondas sonoras en un medio. Para un gas perfecto solo depende de la temperatura.

$$a = \sqrt{\gamma RT}$$

¹⁵ Aerodynamics for Engineering Students, E.L. Houghton, P.W. Carpenter.p.8.

¹⁶ Aerodynamics for Engineering Students, E.L. Houghton, P.W. Carpenter.p.9.

Ecuación 2 Velocidad del sonido

Donde:

γ = Razón de calores específicos C_p/C_v .

R= Constante Universal de los gases.

5.4.2 Número MACH

Importante parámetro no dimensional que determina el comportamiento del flujo. Cuando el número MACH es menor a 0.3 el cambio en la densidad es menor al 5% significando un flujo incompresible

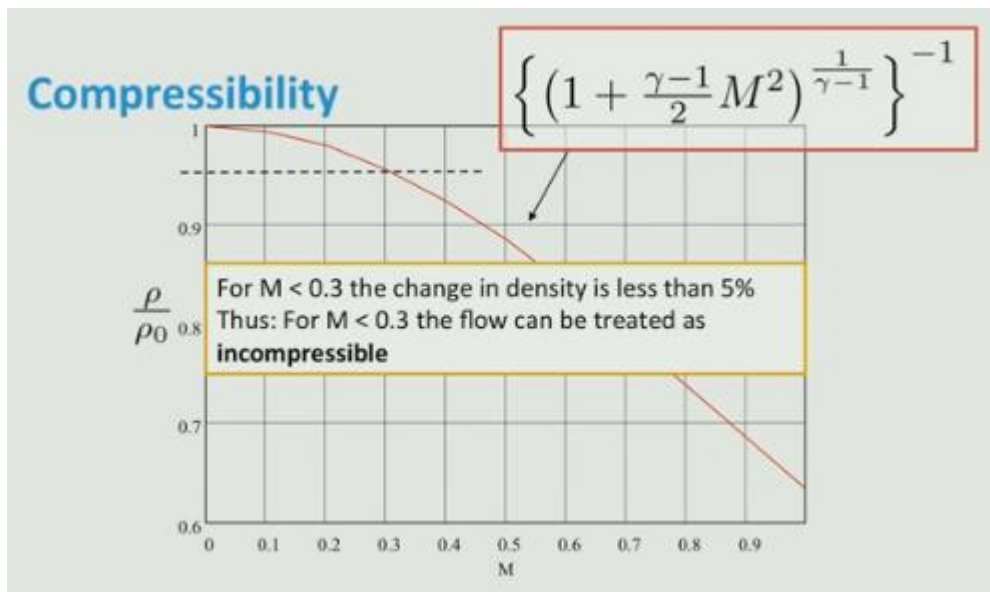


Figura: 5-1 Compresibilidad (Delft University)

$$M = \frac{V}{a}$$

Ecuación 3 Numero MACH

Calculando para el coche tipo Formula SENA Eco:

$$M = \frac{V}{a} \approx \frac{41.66 \text{ m/s}^{17}}{\sqrt{1.4 * 287 \text{ J/KgK} * 291.15 \text{ K}}} = 0.12180$$

1.4.1 Número de Reynolds

Medida no dimensional que representa efectos de escala, simboliza la relación entre la inercia y las fuerzas viscosas creadas en el aire.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Ecuación 4 Numero de Reynolds (White)

Conociendo el número de Reynolds se puede indicar si el flujo es laminar o turbulento.

Para el Coche formula SENA Eco:

$$Re = \frac{0.95 \text{ kg/m}^3 * 41.66 \text{ m/s} * 2.717 \text{ m}}{1.7976 * 10^{-5} \text{ kg/ms}} = 5981904,15$$

Se aclara que la distancia tomada para calcular este parámetro es entre ejes.

5.5 Tipos de flujo

Se consideran dos tipos de flujo:

5.5.1 Flujo laminar

Flujo que posee variaciones suaves y trazas paralelas siguiendo la dirección de la velocidad promedio del fluido. Se caracteriza por no tener fluctuaciones en los campos de presión y velocidad. Posee números de Reynolds por debajo de 100000.

5.5.2 Flujo turbulento

Posee fuertes fluctuaciones aleatorias superpuestas a un flujo medio que experimenta variaciones suaves. Los campos de presión y velocidad varían debido a la presencia de remolinos de diferentes tamaños. Se caracteriza por:

Irregularidad: Aparición de fluctuaciones de los campos (velocidad, presión, temperatura) con tiempos y tamaños diferentes.

¹⁷ <http://www.coc.org.co/all-news/formula-sena-eco-se-corre-en-narino-este-sabado-14-de-noviembre>.

Tridimensionalidad: Aunque la turbulencia a gran escala suele ser bidimensional, a medida que se baja en la escala de tamaño se encuentra que el movimiento a pequeñas escalas es siempre tridimensional

- Difusividad: Los fenómenos de transporte (masa, momento y energía) se ven amplificados por el efecto de la turbulencia debido a las fluctuaciones del movimiento turbulento.
- Disipación: Cuando se desarrolla un flujo turbulento, la turbulencia se mantiene extrayendo energía del flujo principal y aumentando su energía interna mediante la deformación de las partículas, es decir los remolinos más grandes ceden parte de su energía a los más pequeños y así sucesivamente. La turbulencia necesita constantemente el suministro de energía para reponer las pérdidas viscosas. Sin este suministro la turbulencia disminuye rápidamente.
- Altos números de Reynolds: Como las fuerzas de inercia superan las fuerzas viscosas se crea una perturbación que genera el fenómeno de turbulencia.

6.Pruebas de choque

Las pruebas de choque, también conocidas como crash tests los cuales son ensayos reales y/o simulados de carros que son sometidos a colisión contra otro objeto de manera totalmente voluntaria. El objetivo es extraer la mayor información posible acerca de esa colisión para mejorar la seguridad del piloto.

6.1 Estadística de los choques

Según las estadísticas¹⁸ el porcentaje de los tipos de choques más habituales que se producen en los carros.

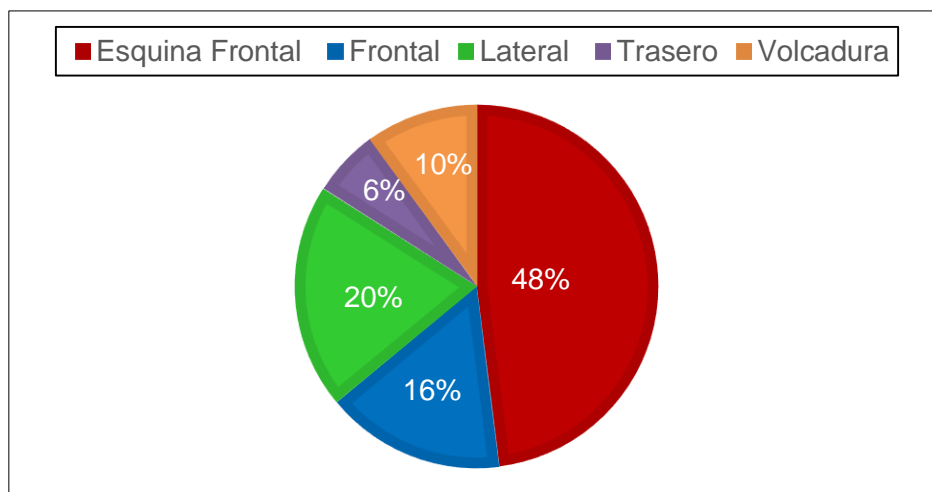


Figura 6-1 Diagrama porcentual de los choques más frecuentes (Autores)

¹⁸ Elementos estructurales del vehículo, p.69.

6.2 Normatividad

En el mundo existen entidades que realizan pruebas de choque y ponen a valoración los diferentes tipos de carros que se encuentran en el mercado actual, entre las más destacadas entidades se encuentran: Euro NCAP (European New Cars Assessment Program), IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) y el NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration).

Para realizar las pruebas simuladas del chasis, se usa la normativa de la Euro NCAP:

6.2.1 Impacto frontal

Para el impacto frontal se realiza a una velocidad de 64 Km/h sobre un obstáculo de 1000 mm de ancho y 540 mm de largo y debe tocar el 40% del ancho del carro.

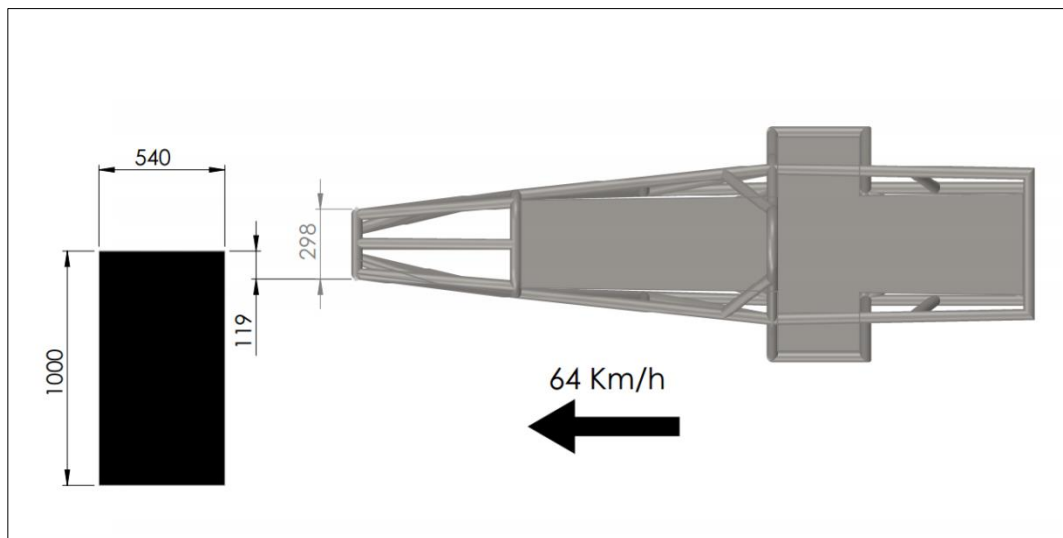


Figura 6-2 Representación de un ensayo de impacto frontal (Autores)

6.2.2 Impacto lateral

Para el impacto lateral según norma ECE R95 de la directiva europea 96/27/CE, el vehículo recibe un impacto perpendicular al habitáculo, El golpe se produce mediante una carretilla deformable de 30 cm de altura y 950 Kg, que se desplaza a 50 Km/h.

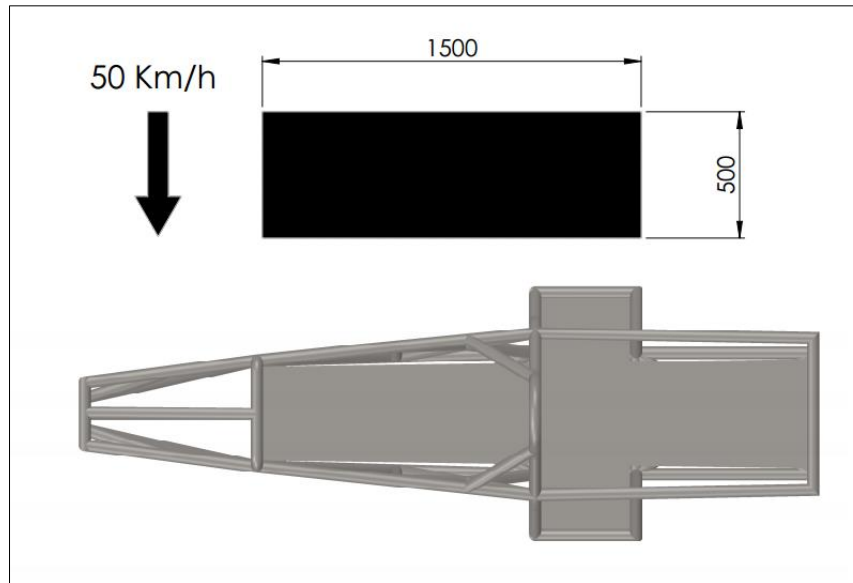


Figura 6-3 Representación de un ensayo de impacto lateral contra un muro (Autores)

Otra prueba que es muy común en la norma Euro NCAP, es un choque contra un poste o esfera de diámetro de 254¹⁹ mm, a 29 Km/h hacia el interior del habitáculo.

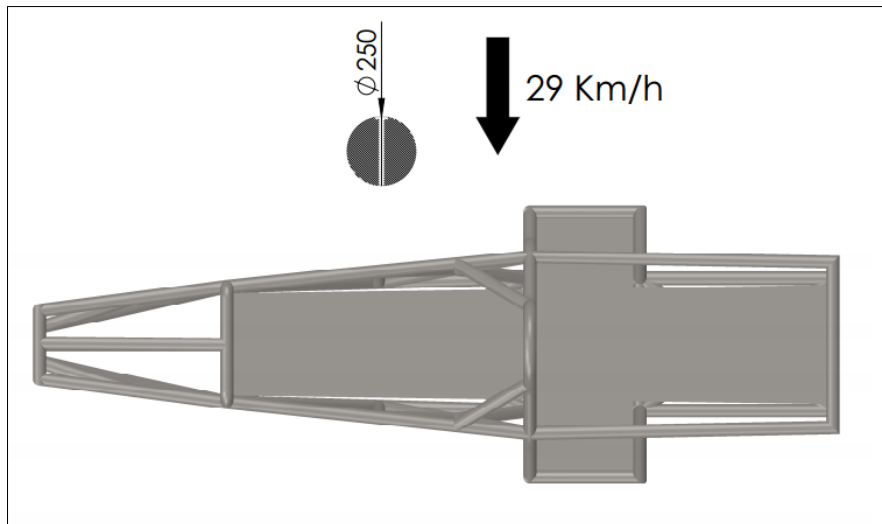


Figura 6-4 Representación de un ensayo de impacto lateral contra una esfera (Autores)

¹⁹ La prueba se hace con un diámetro de 250 mm, el cual es el parámetro que nos da el reglamento de la formula SENA eco.

El objetivo de este test es poner a prueba la carrocería en caso de que un elemento o cono de absorción de otro vehículo quiera ingresar al habitáculo poniendo en riesgo la vida del piloto. En el reglamento de la formula SENA eco²⁰ nos describe la misma situación, pero con un diámetro de 250 mm y la carrocería siempre debe estar en contacto con mínimo tres puntos de apoyo.

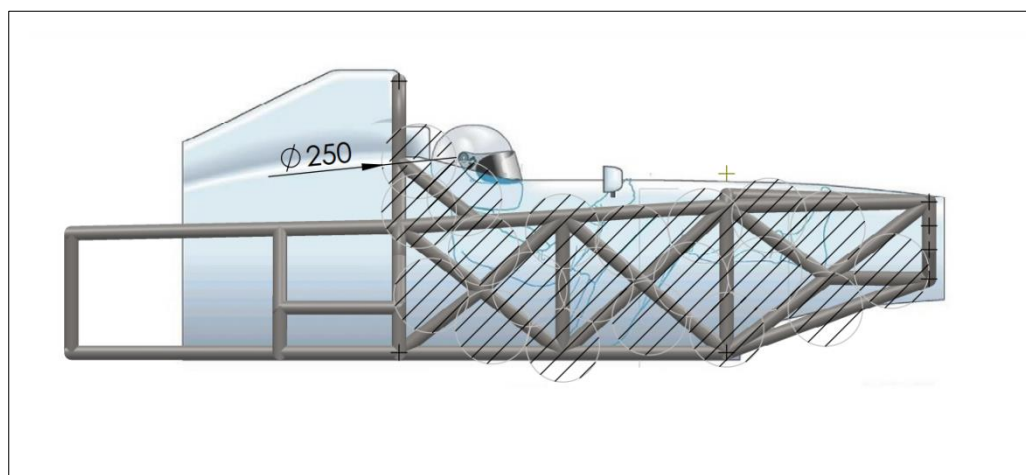


Figura 6-5 Protección del piloto frente a impactos laterales (Autores)

6.2.3 Volcadura

En caso de volcadura el objetivo principal es que el chasis siempre proteja al piloto mediante un triángulo de vida, esto pone a prueba la rigidez de la jaula antivuelco, la Euro NCAP nos dice que debemos realizar este test mediante caída libre a una altura de 500mm.

²⁰ Reglamento técnico formula SENA eco 2015 V1.3, numeral 7.16

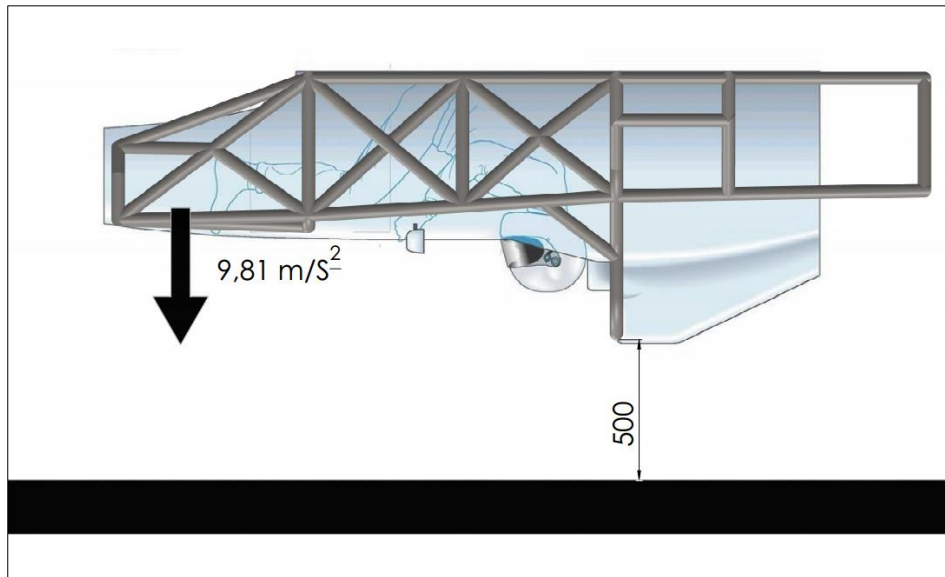


Figura 6-6 Representación de un ensayo de volcadura (Autores)

7.Simulación del chasis

7.1 Simplificaciones e hipótesis

Para poder llevar a cabo una prueba de choque real a un entorno computacional simulado, es necesario realizar algunas simplificaciones, ya que de otra manera se necesitaría bastantes recursos computacionales para dar solución al problema planteado.

Estas simplificaciones deben alterar en lo más mínimo las condiciones iniciales del problema.

7.1.1 Soldaduras

La primera simplificación es que el chasis no se simula con soldaduras, para ello desde el software ANSYS utilizamos la herramienta de conexiones y luego la de pegado, con esto aseguramos que los nodos de la tubería estén siempre unidos. Otra razón por la que obviaremos el cálculo con soldadura, es que esto depende de la experticia y experiencia del soldador, si una soldadura queda mal realizada, existe una alta probabilidad de que falle por ese lugar.

7.1.2 Distancias

Los elementos con los cuales el chasis va a chocar deben estar entre ellos lo más cercano posible, esto simula el instante de tiempo justo antes de la colisión, por lo cual ayuda a disminuir tiempos y recursos computacionales en la simulación.

7.1.3 Elementos secundarios

El objetivo principal es conocer el comportamiento del chasis ante una colisión, por ello no se tiene en cuenta varios elementos que podrían llegar a absorber energía de forma directa e indirecta como lo podrían ser:

- La carrocería
- Las ruedas
- Las tijeras
- El atenuador de impacto

7.1.4 Masas

En la simulación se tiene en cuenta las siguientes masas, las cuales ya se definieron de la siguiente manera.

Nombre	Masa(Kg)
Componentes	137
Chasis	185
Total	322

Tabla 2 Masas utilizadas para la simulación.

7.1.5 Volcadura

Para el caso del análisis de volcadura, no podemos esperar el tiempo de caída libre de 500 mm hasta que toque la superficie del piso, con lo cual vamos a determinar la velocidad con la cual llegaría el chasis antes de chocar contra el piso:

$$V_0 = 0 \frac{m}{s}$$

$$h = 0,5m$$

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$V_{final}^2 = V_0 + 2gh$$

Ecuación 5

$$V_{final} = \sqrt{9,81} = 3,13 \frac{m}{s}$$

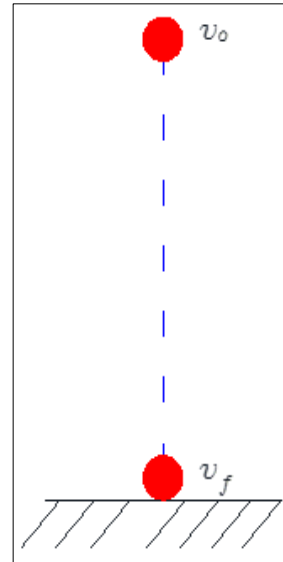


Figura: 7-1 Diagrama de caída de un cuerpo (Autores)

7.2 Tipo de análisis

Para la simulación estructural existen dos tipos de análisis:

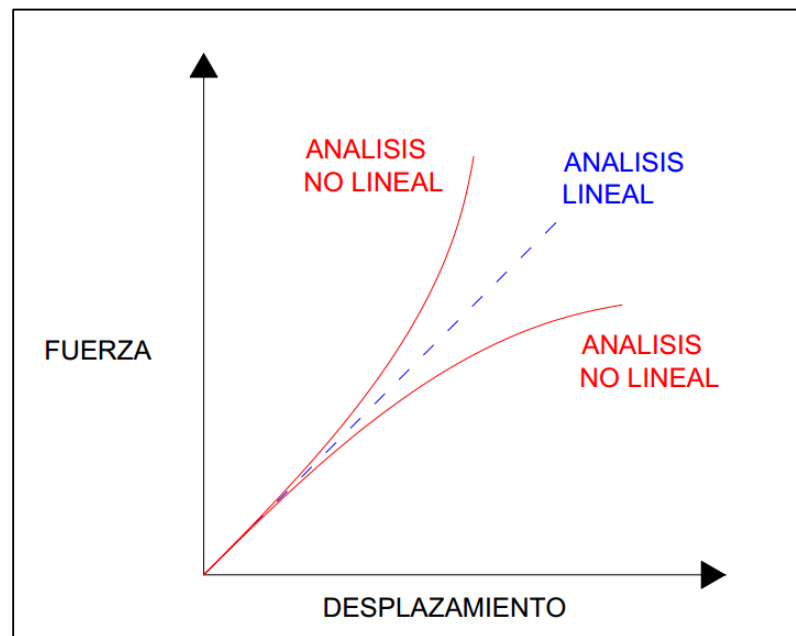


Figura: 7-2 Diagrama Fuerza vs Desplazamiento (Autores)

7.2.1 Análisis lineal

Uno de los parámetros para identificar si un análisis es de tipo lineal es cuando la carga sobre el objeto es estático y constante a lo largo del tiempo, la pieza con carga se deforma con pequeños giros y/o desplazamientos, el diagrama de tensión vs deformación sigue la ley de Hooke

7.2.2 Análisis no lineal

Este análisis está destinado para simulaciones de tipo dinámico, con altas no linealidades y contactos, en los cuales las fuerzas de inercia son significativas²¹. Utilizados para problemas de impacto, con cargas dinámicas, grandes deformaciones de componentes y materiales no lineales, que superen el punto de elasticidad.

De acuerdo a lo anterior el análisis que vamos a usar es de tipo No lineal ya que el choque produce grandes deformaciones y las tensiones a las cuales el material se va sometiendo es dependiente del tiempo.

²¹ HORMAN Matthias LS-DYNA-short introduction.

8. Simulación de la carrocería

8.1 Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos está gobernada por las tres leyes fundamentales de flujo de fluidos:

8.1.1 Conservación de masa (Ecuación de continuidad)

Para un flujo estable, constituye que la masa ingresando en un volumen de control es igual a la masa saliendo de ese volumen de control. Puede estar expresada en forma diferencial o integral.

8.1.2 Conservación de momento

Este principio se basa en la segunda ley de Newton (Ecuación 6) aplicada a un elemento de fluido. También Puede estar expresada en forma diferencial o integral.

$$F = m * a$$

Ecuación 6 Segunda Ley de Newton

La fuerza tiene dos fuentes: de cuerpo como la fuerza gravitacional, eléctrica, magnética, etc. y de superficie relacionada con la distribución de presiones y las fuerzas viscosas.

Dichas fuerzas viscosas tienen que ver con los esfuerzos normal y cortante:

Esfuerzo normal: Es la tasa de tiempo de cambio del volumen, está en adición a la presión.

Esfuerzo cortante: Es la tasa de tiempo de cambio de la deformación cortante en un elemento de fluido.

Ambos esfuerzos dependen de los gradientes de velocidad y en la mayoría de flujos viscosos la componente normal es despreciada.²²

8.1.3 Conservación de energía (Primera ley de la termodinámica)

Establece que el cambio de la energía en un elemento de fluido es igual a la sumatoria del flujo de calor en el elemento más el trabajo realizado debido a las fuerzas superficiales y de cuerpo²³. Debido a que la simulación realizada en este documento es sobre un flujo incompresible, este principio es descartado.

Forma diferencial e integral de las ecuaciones en estado estable:

Principio Físico	Forma diferencial	Forma integral
Conservación de masa	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$	$\iint (\vec{V} \cdot \hat{n}) ds = 0$
Conservación de momento (Componentes x,y,z)	$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u$ $\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v$ $\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w$	$\iint \rho (\vec{V} \cdot \hat{n}) \vec{V} ds = - \iint P \hat{n} ds + F_{visco}$

Tabla 1. Ecuaciones de conservación en forma diferencial e integral

El termino de las fuerzas viscosas expresado como $\mu \nabla^2 u$ representa:

$$\mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

Ecuación 7. Componente de la fuerza viscosa en la dirección x

²² An introduction to computational fluid dynamics p.62.

²³ An introduction to computational fluid dynamics p.67.

$$\mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

Ecuación 8. Componente de la fuerza viscosa en la dirección y

$$\mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

Ecuación 7. Componente de la fuerza viscosa en la dirección x

Las ecuaciones para la conservación de momento son también conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes en este caso para flujo incompresible, considerando la viscosidad constante.

Estas ecuaciones pueden ser expresadas de manera más compacta utilizando su forma vectorial (ecuación 2 y 3):

Conservación de masa:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Ecuación 8. Forma vectorial de la conservación de masa

Conservación de momento:

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V}$$

Ecuación 9. Forma vectorial de la conservación de momento

Si se aplican estos principios sobre una partícula infinitesimalmente pequeña de fluido moviéndose con el flujo, se llegará a la forma diferencial de las ecuaciones en forma de conservación. De forma complementaria, si se aplican los mismos principios a un volumen de control fijo en el flujo, se llegará a la forma integral de las ecuaciones en forma de conservación, en cada uno de los casos estas ecuaciones son no lineales.

8.2 Ecuaciones de gobierno promediadas

El manejo de flujos turbulentos en mecánica de fluidos adiciona la problemática de las fluctuaciones generadas por la misma naturaleza del fluido. Utilizando la descomposición de Reynolds (la cual establece que una variable instantánea puede resultar de la sumatoria entre su valor medio temporal y una fluctuación alrededor del valor promedio²⁴ y adicionando estos valores a las ecuaciones instantáneas de Navier Stokes y de continuidad se obtienen las RANS. Los campos de velocidad y de presión descompuestos se muestran en la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned}u &= \bar{u} + u' \\v &= \bar{v} + v' \\w &= \bar{w} + w' \\P &= \bar{P} + P'\end{aligned}$$

Ecuación 7 Velocidad y presión promediada de Reynolds

8.2.1 Ecuación de continuidad promediada de Reynolds

Tomando la forma diferencial instantánea de la conservación de masa, es decir la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Y reemplazando la velocidad promediada de Reynolds:

$$\frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial z} = 0$$

Ahora bien, la ecuación de la velocidad media puede ser promediada en su totalidad resultando en:

$$\bar{u} = \bar{\bar{u}} + \bar{u'}$$

²⁴ Fluido dinámica Computacional aplicada a vehículos: Estudio de la influencia de las ruedas y los pasos de rueda en la aerodinámica de un automóvil. p29.

El término $\bar{\bar{u}}$ (promedio del promedio) es igual a \bar{u} , operando:

$$\begin{aligned}\bar{u} - \bar{u} &= \bar{u'} \\ \bar{u'} &= 0\end{aligned}$$

Se observa que la velocidad promediada de Reynolds queda resumida a $u = \bar{u}$ y sustituyendo en la ecuación de continuidad promediada de Reynolds:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

Ecuación 8 Conservación de masa promediada de Reynolds²⁵

8.2.2 REYNOLDS AVERAGED NAVIER STOKES

Partiendo de la ecuación instantánea de momento en forma diferencial:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u$$

El flujo no es realmente estable aquí debido a las fluctuaciones, las ecuaciones se deben extender a su forma inestable teniéndose que adicionar un término extra que involucrara la derivada de la velocidad con respecto al tiempo:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u$$

Utilizando la descomposición de Reynolds y sustituyendo la velocidad igual que en la ecuación de continuidad se obtiene para el eje x:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left(\overline{u' \frac{\partial u'}{\partial x}} + \overline{v' \frac{\partial u'}{\partial y}} + \overline{w' \frac{\partial u'}{\partial z}} \right)$$

Utilizando la ecuación de continuidad y extrayendo las derivadas del promedio de velocidades:

²⁵ A Hands-on Introduction to Engineering Simulations course, Cornell University.

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \left(\frac{\partial}{\partial x} (\overline{-\rho u'v'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{-\rho u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{-\rho u'w'}) \right)$$

Los términos $(\overline{-\rho u'v'})$ y $(\overline{-\rho u'w'})$ hacen referencia a los esfuerzos cortantes y $(\overline{-\rho u'u'})$ al esfuerzo normal por unidad de volumen, en ambos casos generados por la turbulencia así:

$$\begin{aligned} (\overline{-\rho u'v'}) &= \tau_{xy} \\ (\overline{-\rho u'w'}) &= \tau_{xz} \\ (\overline{-\rho u'u'}) &= \tau_{xx} \end{aligned}$$

Estos junto a sus respectivas derivadas son los esfuerzos cortantes y normales netos sobre una partícula de fluido. También resultan como un término análogo a la fuerza neta viscosa y se les conoce como las tensiones de Reynolds. La ecuación puede ser simplificada y escrita para el eje x como:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \overline{f_{turb,x}}$$

Ecuación 9 Ecuación RANS para el eje x

Y de forma similar para los ejes Y y Z

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \overline{f_{turb,y}} \\ \rho \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \overline{f_{turb,z}} \end{aligned}$$

Ecuación 10 Ecuación RANS para el ejes y y z.²⁶

²⁶ A Hands-on Introduction to Engineering Simulations course, Cornell University.

8.3 Ecuación de transporte²⁷

Ecuación diferencial que establece la evolución de una propiedad del fluido a lo largo del tiempo y el espacio. Estas propiedades pueden ser la viscosidad turbulenta (μ_t), la energía cinética turbulenta k , la tasa ε de disipación de k , etc. Posee la siguiente estructura:

$$[Tasa\ de\ cambio\ en\ el\ tiempo\ de\ k] + [Transporte\ de\ k\ por\ convección] = [Producción\ de\ k] + [Transporte\ de\ k\ por\ difusión] - [disipación\ de\ k]$$

Ecuación 11 Estructura de la ecuación de transporte (tomando como ejemplo k)

8.4 Métodos de cálculo

Existen diferentes métodos para simular flujos turbulentos. La forma más simple sería resolver de forma directa las ecuaciones de Navier-Stokes (DNS) y así de forma precisa predecir un flujo turbulento resolviendo todas las escalas (temporales y espaciales) sin necesidad de realizar ponderaciones a las ecuaciones. El problema con este tipo de solución es el alto coste computacional y su práctica se limita a geometrías simples con números Reynolds bajos. Otra estrategia que puede ser utilizada para la simulación en este tipo de flujos consiste en tener en cuenta solamente las grandes escalas tanto temporales como espaciales (Torbellinos más grandes) pues estas son las que transportan las propiedades de forma más efectiva, las escalas menores son débiles y su transporte es mínimo. Este modelo recibe el nombre de Large Eddy Simulation (LES) pero sigue siendo costoso en cuanto a rendimiento computacional y tiempo empleado. En la actualidad los modelos empleados frecuentemente para analizar flujos turbulentos se basan en métodos estadísticos, es decir el flujo promediado y los efectos de la turbulencia sobre las propiedades promediadas (RANS) como se explicó anteriormente. Este modelo resulta ser de bajo costo computacional y es bastante preciso por lo que ha sido el escogido en el siguiente proyecto de grado²⁸.

²⁷ Fluidodinámica computacional aplicada a vehículos: Estudio de la influencia de las ruedas y los pasos de rueda en la aerodinámica de un automóvil. p.35.

²⁸ An introduction to computational fluid dynamics p.66.

8.5 Modelos de turbulencia²⁹

Los modelos de turbulencia RANS están clasificados según el número de ecuaciones de transporte adicionales que necesitan para ser resueltos. Los principales se muestran en la siguiente tabla

ECUACIONES DE TRANSPORTE EXTRA	MODELO
0	Modelo de la longitud de mezcla
1	Spalart-Allmaras
2	K- ε
	K- ω
	Modelo algebraico de tensiones
7	RSM (Reynolds Stress Model)

Tabla 3 Principales Modelos de turbulencia

8.5.1 Modelo de la longitud de mezcla

Basado en el modelo de longitud de mezcla de Prandtl describe las tensiones por medio de ecuaciones algebraicas para la viscosidad turbulenta (μ_t) en función de la posición³⁰, no necesita ecuaciones de transporte extra. Este modelo es fácil de implementar y proporciona una predicción acertada en capas límite, estelas y chorros. Por otra parte, no describe flujos con recirculación o separación y solamente calcula propiedades medias y tensiones turbulentas.

Existen otros modelos que no necesitan ecuaciones de transporte extra como lo son los modelos Cebeci-Smith, el de Baldwin-Lomax y el modelo PDT ninguno de ellos utilizado

²⁹ An introduction to computational fluid dynamics p.67.

³⁰ Ibid., p.68

por Ansys Fluent debido a la aparición de modelos más eficientes que si emplean ese tipo de ecuaciones.

8.5.2 Modelo Spalart-Allmaras³¹

Este modelo utiliza una ecuación de transporte para calcular un parámetro de viscosidad cinemática en los remolinos. Fue diseñado específicamente para aerodinámica externa y aplicaciones aeroespaciales, resulta ser poco exhaustivo en cuanto al refinamiento de la malla y además computacionalmente es muy económico comparado con los modelos que emplean dos o más ecuaciones. Es el modelo empleado en este proyecto de grado.

La viscosidad turbulenta se define como:

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1}$$

Ecuación 12 Viscosidad cinemática.

Siendo f_{v1} una función de amortiguación a la pared dada por:

$$f_{v1} = \frac{x^3}{x^3 + C_{v1}^3} ; \quad x \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$$

La ecuación de transporte para este modelo se define como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \tilde{\nu} u) = G_{\tilde{\nu}} + S_{\tilde{\nu}} + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x} \right)^2 \right] - Y_{\tilde{\nu}}$$

Ecuación 13 Ecuación de transporte para $\tilde{\nu}$

O en palabras

³¹ An introduction to computational fluid dynamics p.89.

Tasa de cambio de la viscosidad $\tilde{\nu}$	+ de $\tilde{\nu}$ por convección	= Tasa de producción de $\tilde{\nu}$	+ Transporte de $\tilde{\nu}$ por difusión turbulenta	- Tasa de disipación de $\tilde{\nu}$
--	--------------------------------------	---	---	---

G_v hace referencia a la producción de $\tilde{\nu}$ y se calcula:

$$G_v = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{\nu}$$

Ecuación 14 Producción $\tilde{\nu}$

Donde

$$\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{\nu}}{K^2 d^2} f_{v2}, \quad f_{v2} = 1 - \frac{x}{1 + x f_{v1}}$$

La vorticidad local del fluido (S) se define como:

$$S \equiv \sqrt{2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}}$$

Donde Ω_{ij} es el tensor de vorticidad media igual a:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

La disipación de $\tilde{\nu}$ (Y_v) se da en las paredes del modelo y se expresa como:

$$Y_v = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2$$

Ecuación 15 Disipación de $\tilde{\nu}$

Donde

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6}$$

$$g = r + C_{w2}(r^6 - r)$$

$$r \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} K^2 d^2}$$

El modelo Spalart Allmaras³² posee los siguientes términos constantes:

- $C_{b1} = 0.1355$
- $C_{b2} = 0.622$
- $C_{w1} = \frac{C_{b1}}{K^2} + \frac{(1+C_{b2})}{\sigma_{\tilde{v}}}$
- $C_{w2} = 0.3$
- $C_{w3} = 2.0$
- $K = 0.4187$
- $\sigma_{\tilde{v}} = \frac{2}{3}$
- $C_{v1} = 7.1$

8.5.3 Grupo k- ϵ

Este tipo de modelos utilizan dos ecuaciones de transporte para calcular las viscosidades Eddy. Existen tres tipos:

- k- ϵ Standart
- k- ϵ RNG
- k- ϵ Realizable

A continuación, se hace una breve explicación del modelo estándar para conocer un poco acerca de su funcionamiento. Se deja a decisión del lector el estudio de los demás modelos ya que ninguno de estos fue utilizado en este proyecto debido a su predicción excesiva de esfuerzos cortantes generados por la turbulencia bajo gradientes de presión adversa³³, además de su alto costo computacional.

³² Fluidodinámica Computacional aplicada a vehículos: Estudio de la influencia de las ruedas y los pasos de rueda en la aerodinámica de un automóvil.p.40.

³³ An introduction to computational fluid dynamics p.88.

8.5.4 k-ε standart ³⁴

En este modelo de turbulencia, la viscosidad turbulenta (viscosidad Eddy) es calculada mediante dos ecuaciones de transporte. Las propiedades transportadas son k y épsilon (ε).

K representa la energía cinética turbulenta, es una medida que indica la cantidad de este tipo de energía contenida en las fluctuaciones, así cuanto mayores sean las fluctuaciones turbulentas mayor será k. Épsilon (ε) es la disipación turbulenta y representa la tasa en que la energía cinética es disipada. La viscosidad turbulenta μ_t desde estas dos propiedades será calculada como

$$\frac{\mu_t}{\rho} \approx \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon}$$

Ecuación 16 Viscosidad Turbulenta

Las ecuaciones de transporte para k y ε están dadas por

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

Ecuación 17 Energía cinética turbulenta

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \varepsilon u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

Ecuación 18 Tasa de disipación de k

Los términos G_k y G_b hacen referencia a la producción de la energía cinética turbulenta, la primera gracias a los gradientes de velocidad y la segunda se debe a los efectos de flotabilidad. El término Y_M corresponde a la disipación y S es el modulo del tensor de deformación.³⁵

³⁴ A Hands-on Introduction to Engineering Simulations course, Cornell University.

³⁵ Fluidodinámica Computacional aplicada a vehículos: Estudio de la influencia de las ruedas y los pasos de rueda en la aerodinámica de un automóvil.p.42.

El modelo tiene los siguientes términos constantes que toman los valores:

- $C_{1\varepsilon} = 1.44$
- $C_{2\varepsilon} = 1.92$
- $C_\mu = 0.09$
- $\sigma_\varepsilon = 1.3$
- $\sigma_k = 1.0$

Este modelo solo necesita condiciones iniciales y logra buenos resultados para muchos flujos industriales, además tiene una amplia validación. Al necesitar de dos ecuaciones de transporte extra resulta costoso en términos computacionales y necesita de una malla muy refinada para lograr buenos resultados.

8.5.5 Grupo k- ω

Como en el grupo anterior, este modelo utiliza dos ecuaciones de transporte para mediante una tercera relación hallar la viscosidad turbulenta. Los principales son:

- Wilcox k - ω Standart
- Wilcox k - ω Modificado
- SST k - ω

Se explica de forma resumida el modelo Wilcox k - ω modificado ya que es el implementado por Fluent, los demás se dejan a criterio del lector pues como en el grupo anterior ninguno de estos fue utilizado debido a que no son tan precisos cuando se trata de flujos con grandes recirculaciones o vorticidades como es el caso de la aerodinámica en los autos de competición.

Modelo Wilcox k - ω Modificado

La viscosidad Eddy para este modelo de turbulencia es calculada por medio de dos ecuaciones de transporte. Esta vez las propiedades transportadas son k y ω (ω). Como en el grupo anterior, k representa la energía cinética turbulenta mientras que ω es la tasa de disipación específica de ese tipo de energía. Desde estas dos propiedades la viscosidad turbulenta es calculada como

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega}$$

Ecuación 19 Viscosidad turbulenta

Donde α^* esta dada por:

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right)$$

Siendo

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}, \quad \alpha_0^* = 0.024$$

Las ecuaciones de transporte para k y ω están dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k + -Y_k + S_k$$

Ecuación 20 Energía cinética turbulenta

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \omega u) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + G_\omega + -Y_\omega + S_\omega$$

Ecuación 21 Tasas de disipación específica

Los términos $\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$ y $\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}$ indican las difusividades específicas para k y ω .

La generación de las propiedades transportadas se debe como en el modelo k - ε a los gradientes de velocidad y los efectos de flotabilidad. Los términos Y_k y Y_ω hacen referencia a los dos tipos de disipación de k .³⁶ El modelo utiliza los siguientes términos constantes:

- $\alpha_\infty^* = 1$
- $R_k = 6$
- $\sigma_k = 2.0$

³⁶ Fluidodinámica Computacional aplicada a vehículos: Estudio de la influencia de las ruedas y los pasos de rueda en la aerodinámica de un automóvil.p.53.

- $\sigma_{\omega} = 2.0$

Este modelo resulta ideal para flujos a bajo número de Reynolds. Para un mayor entendimiento acerca de las constantes e información adicional acerca del modelo consultar ³⁷.

8.5.6 Modelo algebraico de tensiones

Con este modelo se propone remover o modelar los términos de convección y difusión en las ecuaciones de transporte de tensiones de Reynolds, reduciendo la expresión a un conjunto de ecuaciones algebraicas. Se pueden emplear dos métodos, el primero es despreciar ambos términos a la vez y el segundo es asumir que la sumatoria de la convección y la difusión de las tensiones de Reynolds son proporcionales a su sumatoria para la energía cinética turbulenta. Este modelo tiene en cuenta la anisotropía de las tensiones.

$$R_{ij} = \overline{u_i' u_j'} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \left(\frac{C_D}{C_1 - 1 + \frac{P}{\varepsilon}} \right) \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right) \frac{k}{\varepsilon}$$

Ecuación 22 Modelo algebraico de tensiones

Siendo P la tasa de producción de la energía cinética turbulenta. Este modelo debe ser empleado cuidadosamente pues resulta apto para flujos donde los términos de convección y difusión puedan ser modelados o despreciados.

³⁷ (Weeratunge Malalasekera, 1995), Pág. 90.

9.Pre-proceso chasis

9.1 Generación de la geometría

Para realizar una simulación en cualquier software de elementos finitos, lo primero que necesitamos es elaborar un dibujo en 3D que muestre exactamente lo que se quiere simular, para ello se utiliza el software Solidworks³⁸ siguiendo los siguientes pasos a continuación:

1. Mediante la herramienta 3Dsketch elaboramos las líneas que van a ser más adelante la estructura tubular, antes de dibujar toca tener en cuenta el criterio de espacio y la normatividad de la formula SENA eco.

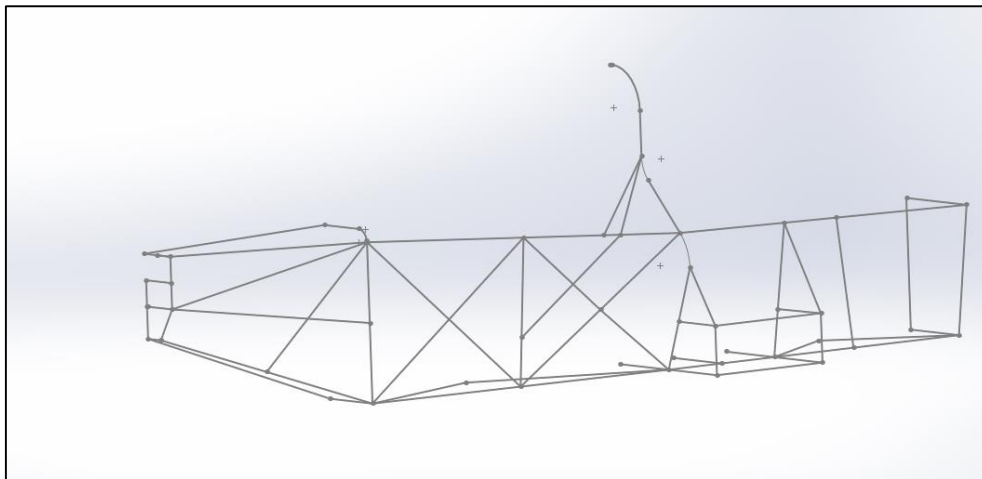


Figura 9-1 Sketch del chasis (Autores)

2. Usando el comando miembro estructural en el software seleccionamos el tamaño de la tubería que queremos introducir, se usa el de 1-1/2" Schedule 40.
3. Con el comando eliminar cara, se elimina el espesor de la tubería y dejamos solo la superficie externa, quedando está en forma de cascara.

³⁸ Mediante la cooperación de Tecno parque SENA, fue posible utilizar este software para elaborar el chasis y la carrocería de este trabajo.

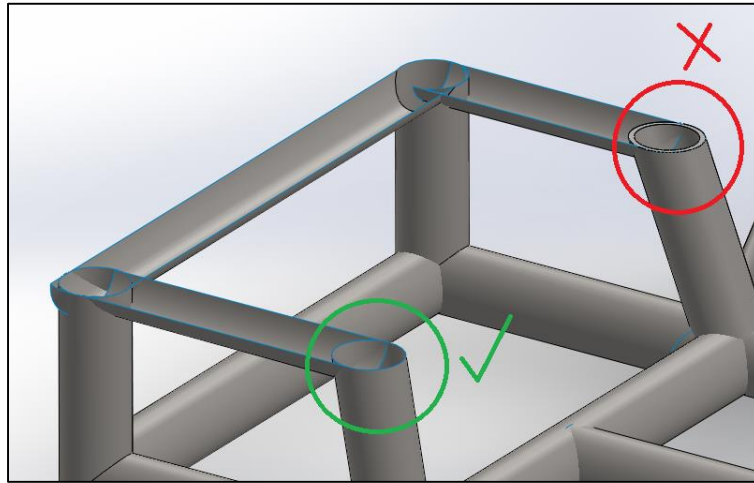


Figura 9-2 Tubería con espesor y sin espesor (Autores)

4. Se dibuja el elemento con el que el chasis va a chocar, teniendo en cuenta la normatividad euro NCAP.
5. Guardamos el dibujo.

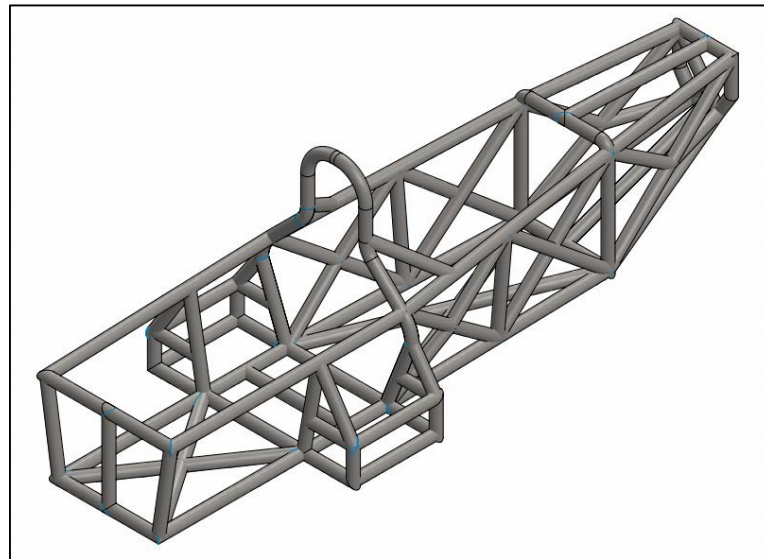


Figura 9-3 Chasis totalmente dibujado (Autores)

9.2 Propiedades del material

Con el software ANSYS y el módulo Explicit Dynamics³⁹ seleccionamos datos de ingeniería y allí están cargadas varios elementos en donde seleccionamos el acero estructural⁴⁰ NL(No Lineal), el cual es propicio para el análisis que vamos a usar. Dé ser necesario esta librería se puede modificar y crear nuevos materiales ingresando los datos del material que el software le solicite.

9.3 Geometría

Después de haber exportado el modelo en 3D al Software ANSYS, procedemos a especificar el espesor de la tubería y seleccionar el material que previamente habíamos cargado en la librería.

9.4 Mallado

La idea fundamental del enmallado consiste en dividir en secciones muy pequeñas el modelo mediante tetraedros, prismas y/o hexaedros para el modelo en 3D, a cada una de estas figuras geométricas se le llaman elementos

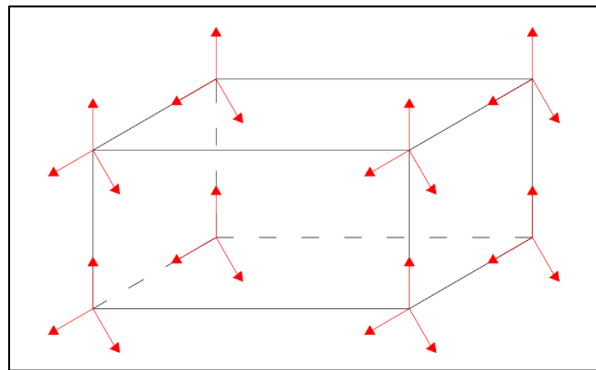


Figura 9-4 Elemento hexaédrico con 24 coeficientes y 8 nodos (Autores)

³⁹ Este módulo es la herramienta de ANSYS para realizar simulaciones de tipo dinámico y no lineal

⁴⁰ Este acero tiene por defecto en el sistema 200 GPa en el módulo de Young y 250 MPa para el límite de fluencia

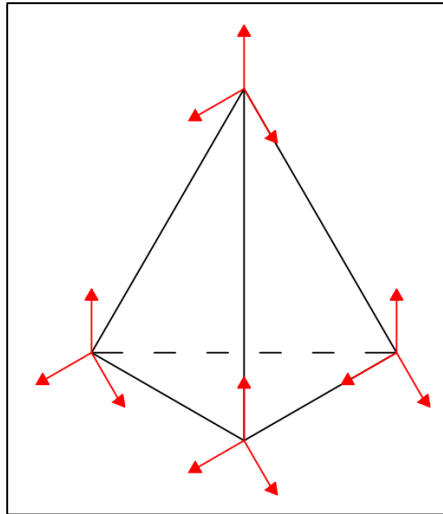
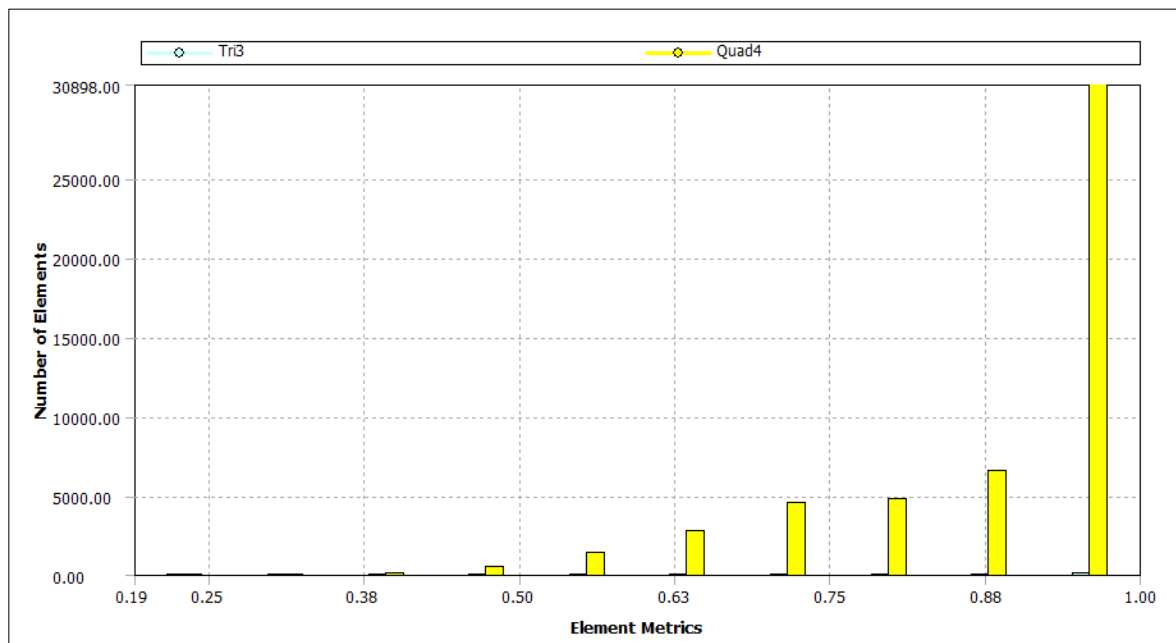


Figura 9-5 Elemento tetraédrico con 12 coeficientes y 4 nodos (Autores)

Para determinar la calidad del enmallado, el software nos muestra una estadística del enmallado, donde debe estar la mayoría de los elementos cercanos a 1.



9.5 Condiciones iniciales

Las condiciones a tener en cuenta en el análisis dinámico no lineal son las siguientes:

1. Se debe seleccionar la velocidad del chasis dependiendo la prueba de choque que se vaya a realizar, esta velocidad la definimos dependiendo el tipo de choque y también del sistema de coordenadas, ya sea para X, Y y/o Z
2. Se debe definir un tiempo de duración estimado para la simulación, para este trabajo se utilizó 0,06s de tiempo.⁴¹
3. Colocamos los soportes fijos en la cara del elemento con que el chasis va a impactar.
4. En el caso de volcadura debemos insertar la aceleración de la gravedad dentro del análisis.
5. En solución debemos especificar los tipos de soluciones. Para este caso se selecciona el de tensión.

⁴¹ Este tiempo fue definido de acuerdo a la gráfica de energía, ya que debe ser suficiente el tiempo para que la energía cinética se transforme en su totalidad en energía interna

10. Pre-proceso carrocería

10.1 Método numérico en CFD

El método numérico utilizado por Ansys- Fluent es el método de volúmenes finitos el cual consiste en tomar el dominio del fluido y dividirlo en pequeñas celdas o volúmenes de control. Luego se aplican los principios de conservación directamente a cada celda usando la forma integral de las ecuaciones de gobierno. Fluent reduce el problema para determinar solo un conjunto finito de valores (discretización) en el centro de cada celda.

10.2 Esquemas numéricos y linealización⁴²

Ansys-Fluent maneja dos tipos de esquemas para solucionar el conjunto de ecuaciones de gobierno los cuales son:

- Segregated: Se resuelven de forma secuencial y separada las ecuaciones de gobierno del sistema. Ansys –Fluent maneja 4 algoritmos de este tipo: SIMPLE, SIMPLEC, PISO y FRACTIONAL-STEP METHOD (FSM). El primero, usa una relación entre las correcciones de presión y velocidad para hacer valer la conservación de la masa y así obtener el campo de presión. SIMPLEC es una variación del modelo SIMPLE cuya diferencia principal es el empleo de una ecuación de corrección que permite acelerar la convergencia en problemas donde la unión de presión y velocidad es el principal impedimento para la obtención de soluciones. Este esquema posee corrección de skewness lo cual permite dar una solución con mallas altamente degeneradas. El esquema PISO se basa en el alto

⁴² Manual de Ansys.Sección 29.3.1.

grado de aproximación entre las correcciones para la presión y la velocidad, en los dos esquemas anteriores nuevas velocidades y flujos no satisfacen el balance de momento y como resultado los cálculos se deben repetir hasta que se logre el balance. Posee corrección de skewness y de acoplamiento en las vecindades. En FSM las ecuaciones de momento son desacopladas de la ecuación de continuidad usando una técnica matemática conocida como factorización aproximada permitiendo controlar el error de división. Todos estos esquemas son semi-implícitos resultando en baja convergencia.

- Coupled: Es el esquema seleccionado para este proyecto pues resulta ser el más robusto y eficiente para flujos en estado estable ofrecido por Ansys. Los esquemas segregados resuelven las ecuaciones (momento) y correcciones (presión) de forma separada. El esquema Coupled resuelve las ecuaciones de momento y continuidad al mismo tiempo. El acoplamiento implícito total es alcanzado a través de una discretización implícita de los términos del gradiente de presión en las ecuaciones de momento y una discretización implícita del flujo de masa. No necesita correcciones pues se obtienen los campos de velocidad y presión de forma simultánea, es un esquema completamente implícito.

10.3 Discretización

Como se comentó anteriormente, los campos de variables en fluent son resueltos en el centro de los volúmenes de control implementando las ecuaciones de transporte. Se necesita conocer los valores (en las caras) y gradientes (en la malla) de las cantidades transportadas, esto se logra interpolando la información en los centros de las celdas mediante un conjunto de métodos de solución.

Los gradientes de las variables se requieren para evaluar la velocidad y difusividad del flujo. Para su cálculo fluent implementa tres métodos:

- Green-Gauss Cell-Based
- Green-Gauss Node-Based
- Least Squares Cell-Based

Se utilizó Least Squares Cell-Based ya que está recomendado para mallas no estructuradas como la de este proyecto, además minimiza la falsa difusión siendo más exacto y menos costoso en términos computacionales. Green- Gauss Node-Based se descarta por su alto costo computacional y Green-Gauss Cell Based aunque es económico no se tiene en cuenta por su inexactitud en la solución (falsa difusión).⁴³

Para los términos de convección (momento y viscosidad turbulenta) la interpolación se lleva cabo mediante los siguientes esquemas:

- First-Order Upwind
- Second-Order Upwind
- Power Law
- MUSCL
- QUICK

En este proyecto se empleará second-order upwind ya que es ideal para mallas tetraédricas y para flujos no alineados, se logra la convergencia de una forma más lenta pues para el cálculo de los valores se emplean aproximaciones por series de Taylor de primer grado. Se descarta first-order upwind pues da una solución inicial y cuando el flujo no está alineado con la malla (el fluido cruza las líneas de forma oblicua) se incrementa el error de discretización, en general es menos exacto. Power law generalmente tiene la misma exactitud que first-order upwind y suele utilizarse con bajos números de Reynolds, caso que no se da en este trabajo. Los esquemas MUSCL y QUICK ofrecen una mayor exactitud que second-order upwind solamente en flujos que presentan remolinos y alta rotación. No se tiene en cuenta el esquema QUICK pues se aplica a mallas hexaédricas y cuadrangulares. También se utilizó el esquema second-order para calcular la presión en las caras de los volúmenes de control pues aunque es más caro computacionalmente que otros esquemas (Standard y lineal), presenta mayor precisión.⁴⁴

⁴³ Manual de Ansys. Sección 21.3.3.

⁴⁴ Ibíd., sección 21.3.1.

10.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno o condiciones iniciales son indispensables para dar una solución concreta a las ecuaciones. Estas definen los valores de las variables de fluido en las fronteras influyendo de manera directa en la solución dentro del dominio. Fluent suele utilizar estas condiciones como primera solución para empezar las iteraciones

En la figura se muestran las condiciones de contorno utilizadas para este proyecto, las caras 1, 2 y 3 corresponden a las paredes del dominio siendo de tipo simétrico con gradientes iguales a cero. La cara 4 corresponde al suelo del dominio, es una pared estática sin deslizamiento.

La superficie 5 representa la mitad del monoplaza y posee las mismas características del suelo. La cara 6 representa la entrada de la velocidad que para este proyecto se toma un valor máximo de 41.666 m/s^{45} con parámetro de turbulencia Turbulent Viscosity Ratio

igual a 10 por ser el más adecuado para flujos externos mientras que la cara 7 es la salida de presión y utiliza el mismo parámetro de turbulencia.

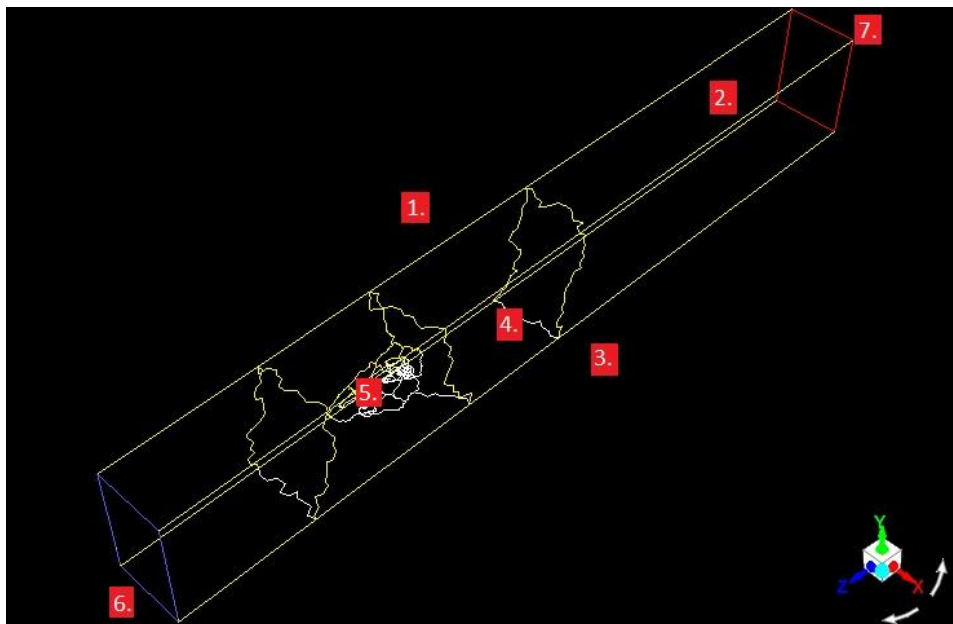


Figura: 10-1 Condiciones de contorno (Autores)

⁴⁵ <http://www.coc.org.co/all-news/formula-sena-eco-se-corre-en-narino-este-sabado-14-de-noviembre>.

Para las condiciones del fluido (aire) se tomaron valores de viscosidad absoluta y densidad iguales a: $1.7976 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$ y 0.95 kg/m^3 respectivamente. Esta simulación se realiza con las llantas estáticas.

10.5 Simulación Ansys 17

Conociendo los principios básicos involucrados en la mecánica de fluidos y el modelo de turbulencia a utilizar, se comienza el proceso de simulación para el monoplaça tipo Formula SENA Eco. Se da inicio con la preparación de la geometría para luego enmallar las superficies y posteriormente ingresar esta información en el solver donde se darán los parámetros para conocer los resultados.

10.6 Preparación de la geometría

10.6.1 Generalidades

Crear un modelo tridimensional del vehículo en un software CAD teniendo en cuenta todas las características (Espejos, antenas, underbody, tomas de aire, etc.) y dimensiones reales. Ingresar el modelo a Ansys- fluent para la simulación del comportamiento aerodinámico. Preparar el modelo para la simulación, es decir, asegurarse que el modelo CAD este tan limpio como sea posible.

10.6.2 Geometría del vehículo

Inicialmente, el modelo CAD debe estar en forma sólida y no en superficies. Este debe ser suave para permitir la generación y crecimiento de la capa de prismas (elementos necesarios para medir el comportamiento de la capa limite) desde la superficie del vehículo, se deben evitar los ángulos agudos y las cavidades como entradas de aire deben ser selladas.

Se realizan dos modelos, uno con carenado trasero desviando parte del flujo sobre las llantas y otro sin estas superficies. Se desea observar la aplicabilidad o no de dichos perfiles dependiendo los resultados obtenidos en la simulación, ambos modelos se construyeron a partir de una pieza base y luego se fueron adicionando secuencialmente las demás partes como los pontones, las tijeras, las llantas y los carenados.

El área frontal para el modelo con carenados es de 1.070 m^2 mientras que para el modelo sin carenados es de 1.042 m^2

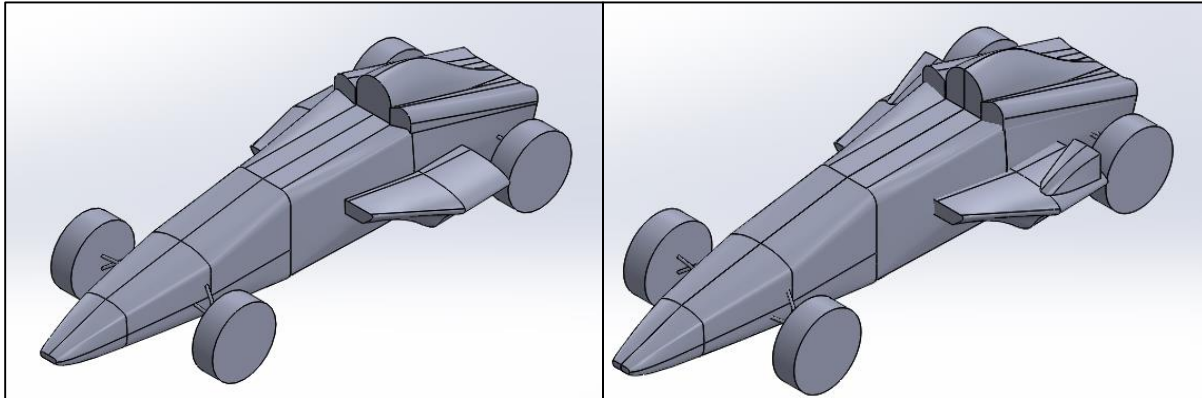


Figura: 10-2 Modelo sin carenado (izquierda) y con carenado (derecha). (Autores)

10.6.3 Dominio computacional

Teniendo el monoplaza en el software CAD se comienza con la generación del dominio computacional. Las longitudes parten del modelo cuyas dimensiones reales se presentan en la siguiente tabla.

Dimensión (mm)	Medida (mm)
Alto	1001
Largo	4150
Ancho	1600

Tabla 4 Dimensiones del monoplaza

Tomando estas dimensiones, se genera el dominio computacional⁴⁶ mostrado en la tabla. Se toma el modelo con un plano de simetría enmallando solo la mitad del vehículo.

⁴⁶ (David Blanco, 2015), Pág. 1

Distancia	Dimensión (mm)
Prototipo - Flujo de entrada	3*largo del monoplaça (12450)
Prototipo - Flujo de salida	7* largo del monoplaça (29050)
Ancho Total	2*ancho del monoplaça (3200)
Modelo – Techo	5* alto del monoplaça (5050)

Tabla 5 Dimensiones del dominio computacional

Se genera una caja interna para controlar el volumen de la malla cercano al monoplaça cuyas dimensiones serán la mitad de la longitud del monoplaça al frente, al lado, encima y una longitud en la parte trasera

10.7 Generación de la malla

En ANSYS la malla puede ser creada con diferentes elementos como los que se muestran en la figura. Para el presente proyecto se genera una malla híbrida no estructurada cuyo propósito es resolver las ecuaciones de conservación de masa y momento. La malla desarrollada está compuesta de elementos tetraédricos en el dominio y prismas sobre la superficie del monoplaça y posteriormente en el piso del dominio computacional.

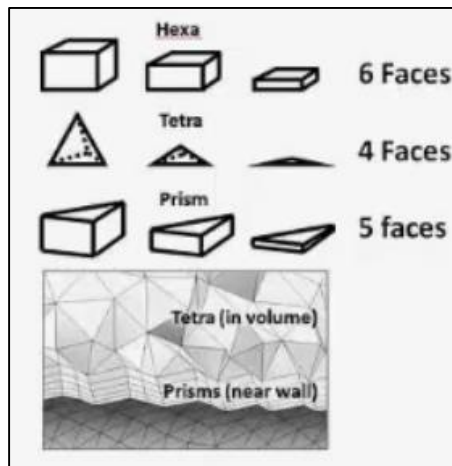


Figura: 10-3 Elementos para la elaboración de la malla

Se comienza calculando el tamaño superficial promedio del elemento que será asignado a todas las caras del monoplaza, logrando así una distribución inicial para la malla.

Aplicando el método gráfico⁴⁷ se determina el tamaño tomando como base los valores de la velocidad de la corriente libre y los de la resolución de la malla.

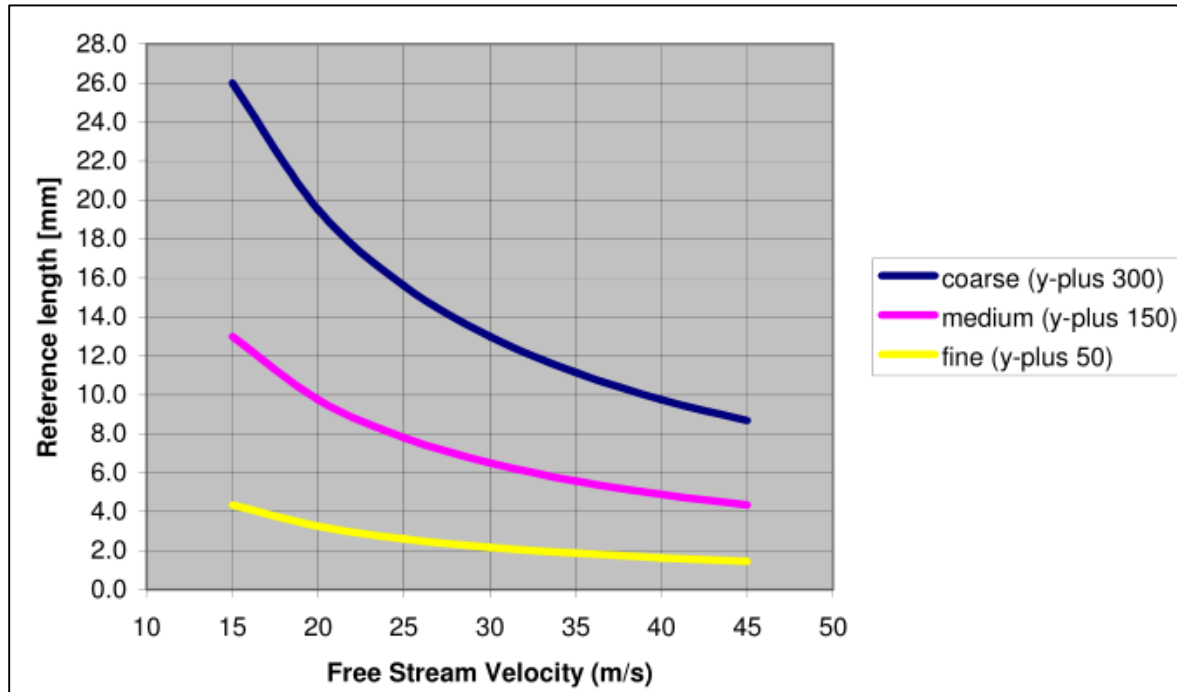


Figura: 10-4 Método gráfico para la estimación del tamaño inicial (Lanfrit, 2005)

Para el formula SENA Eco, la velocidad será de **41.666 m/s** y debido al gasto computacional se tomará una resolución de malla coarse dando como resultado superficial un tamaño promedio de 9mm. En el presente trabajo se desarrollan 7 mallas: 4 para el modelo con carenado y tres para el vehículo sin carenado.

Se crea la caja interna que servirá para refinar la malla alrededor del vehículo, los cambios en el tamaño, cantidad de nodos y elementos, calidad (Skewness) de cada malla se muestran en la tabla.

⁴⁷ (Lanfrit, 2005),pág. 3.

MODELO CON CARENADOS						
	TAMAÑO ZONA REFINADA (mm)	TAMAÑO EXTERNO(mm)	No. ELEMENTOS	No. NODOS	SKEWNESS	PRISMAS
MALLA 1	130	800	4511172	977102	0,58970	541541
MALLA 2	100	700	4706424	1013349	0,58794	579548
MALLA 3	90	700	10623039	2028610	0,50038	612165
MALLA 4	90	700	11566744	2200079	0,50061	657163
MODELO SIN CARENADOS						
MALLA 1	130	800	4461420	962034	0,588545	541644
MALLA 2	100	700	4666463	1002013	0,587695	555253
MALLA 3	130	800	6382554	1307521	0,50034	594725

Tabla 6 Tamaño de la malla

La interpolación llevada a cabo puede verse afectada por la deformación en cada elemento, cuanto más alteradas estén las secciones peores serán los cálculos. La calidad de los elementos de la malla está dada por el Skewness, debe ser un valor pequeño para lograr que los elementos sean equiláteros. En la tabla se muestra la calidad dependiendo el valor del skewness.

VALOR DEL SKEWNESS	CALIDAD DEL ELEMENTO
1	Degenerado
0.9 - <1	Malo
0.75 - 0.9	Pobre
0.5 – 0.75	Aceptable
0.25 – 0.5	Bueno
>0 – 0.25	Excelente
0	Equilátero

Tabla 7 Skewness y calidad

Se inserta el método tetraedros con el algoritmo Patch Independent que es usado cuando se utilizan geometrías complejas como lo es el caso de este proyecto. Luego se insertan tres Sizing indicando los tamaños para el conjunto tijeras-llantas y la zona externa e interna del dominio computacional con una tasa de crecimiento inicial de 1.2, 1.15 y 1.13 esto buscando un mayor refinamiento de la malla. Los demás parámetros son controlados por el software.

En CFD los sucesos ocurren en las paredes, se debe captar que ocurre con la capa limite y esto se logra con la generación de los elementos prismáticos. Para esto se inserta mediante dos inflation una capa de cinco elementos con tasa de crecimiento de 1.2 y una altura de 3 mm sobre la superficie del monoplaza y el piso. Los demás parámetros son los predeterminados del software. Estos elementos se usan para capturar los gradientes de velocidad por estar alineados con el flujo del fluido. La malla 1 se realizó sin prismas en el suelo para observar la variación de los resultados y el comportamiento del fluido durante la simulación, no alcanzando la convergencia y presentando gran inestabilidad en Fluent. Se decide implementar también una capa de prismas en el suelo para mejorar estos inconvenientes.

A continuación, se muestra de forma general el tipo de malla utilizada para las diferentes simulaciones, el cambio se da en los tamaños de los elementos, pero la estructura y funciones empleadas en Ansys es la misma para todas.

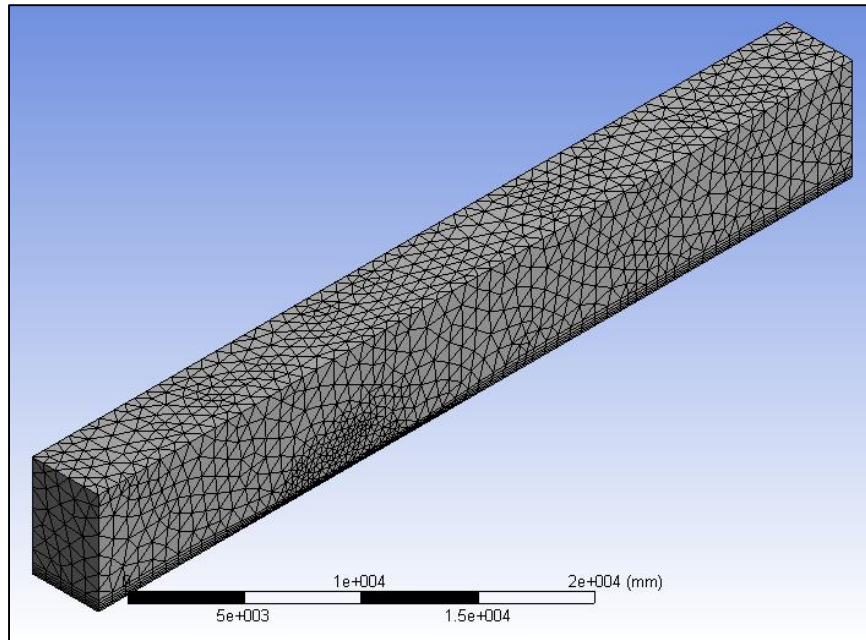


Figura: 10-5 Malla del dominio computacional. (Autores)

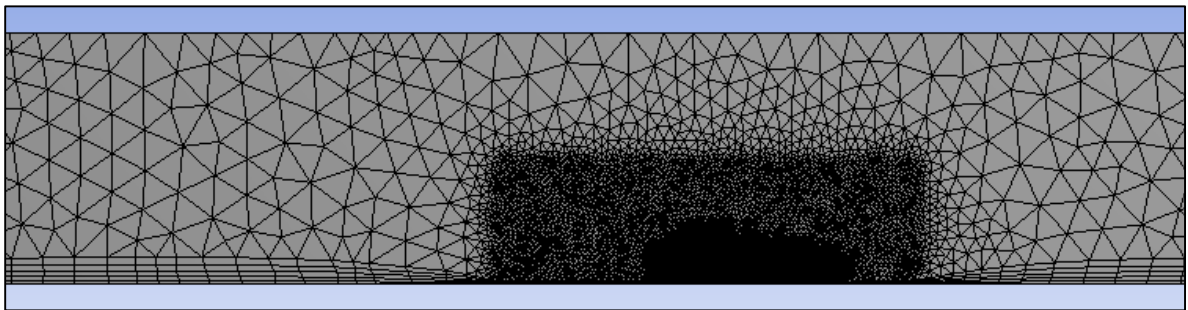


Figura: 10-6 Caja interna rodeando el vehículo con un refinamiento de los elementos. Se observan los prismas en el piso del dominio computacional. (Autores)

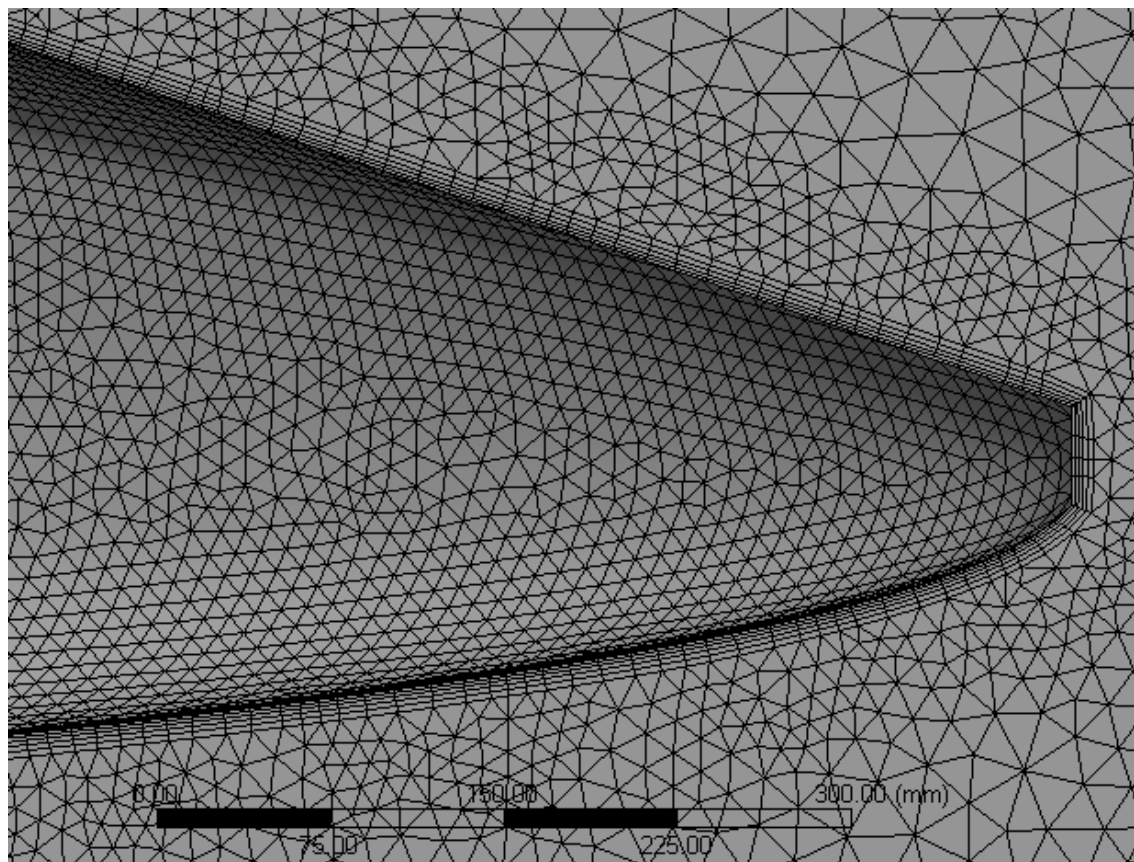


Figura: 10-7 Capa de Prismas en la punta del monoplaza. (Autores)

11. Post Procesamiento chasis

El software estudia el comportamiento de la deformación o la tensión, esto lo hace transmitiendo las cargas desde un nodo hacia el otro nodo del elemento vecino, para un análisis dinámico esto lo hace de forma iterativa resolviendo la siguiente ecuación:

$$[M]\dot{u}(t) + [C]\ddot{u}(t) + [K]u(t) = [F](t)$$

Ecuación 23 Análisis dinámico FEA

$[K]$ = Matriz de rigidez

$[C]$ = Matriz de amortiguamiento

$[M]$ = Matriz de masa

$u(t)$ = Vector de desplazamiento dependiente del tiempo

$\dot{u}(t)$ = Vector de velocidad dependiente del tiempo

$\ddot{u}(t)$ = Vector de aceleración dependiente del tiempo

11.1 Energía Cinética

La energía cinética es un tipo de energía que se debe al movimiento de un cuerpo, esta se describe como la cantidad de trabajo que requiere un cuerpo con determinada masa para llegar a una velocidad.

$$E_K = \frac{1}{2} m v^2$$

Ecuación 24 Energía cinética

11.2 Energía Interna

Este tipo de energía se debe a las excitaciones atómicas y moleculares que producen una reacción química.

Esta reacción química se ve manifestado mediante el aumento de la temperatura, el sonido y los cambios de forma.

$$\Delta I = \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_k$$

Ecuación 25 Energía interna

La conservación del momentum prohíbe que toda la energía cinética incidente se convierta en energía interna porque el sistema final debe poseer momentum y, por tanto, energía cinética.⁴⁸

11.3 Choques inelásticos

Son colisiones en que la energía cinética final es menor que la inicial, es decir en las que parte de la energía cinética se convierte en energía interna

Esto también se define como la velocidad del choque en el instante uno es mayor que después del choque, en el instante 2.

11.4 Hourglass energía

Es una energía de deformación que se produce sin necesidad de que existan tensiones o esfuerzos, esto suele ocurrir cuando el software realiza integraciones puntuales.

Esta energía es complicada de eliminar ya que se debe activar la integración completa para todos los elementos, sin embargo esto traería consecuencias negativas como mayor consumo computacional, por ello es mejor refinar la malla, verificar las propiedades del material, usar cascarones o superficies para reducir la cantidad de Hourglass en la simulación.⁴⁹

⁴⁸ CROMER, Alan H. Física para las ciencias de la vida

⁴⁹ YU, Da. Dynamic Responses of PCB Under Product Level Free Drop Impact

11.5 Energía de contacto

Esta energía se puede ver representada en 4 formas distintas, energía esclava(EE), energía maestra(EM), energía de fricción (EF) y la suma de las energías esclavo más la de energía maestra ($S.EM$)

$$S.EM = EM + EE$$

Ecuación 26 Energía maestra

11.5.1 Energía positiva

En un choque debe existir fricción entre las superficies que entran en contacto entre sí, para saber si esta condición cumple se debe observar la gráfica de energía, en la cual el pico máximo de energía de contacto debe ser superior al 10% con referencia al pico máximo de energía interna.

11.5.2 Energía negativa

Cuando se produce energía negativa esto se debe a que las partes se deslizan entre sí, cambiando su dirección, pero no su magnitud ya que se encuentran presentes las fuerzas de contacto normales y penetraciones normales.

Cuando la energía negativa se manifiesta como un espejo en comparación con la energía interna, es porque algo anda mal y se debe reducir en lo máximo posible.⁵⁰

El software mediante la siguiente ecuación define la energía de contacto así:

$$E_{contacto}^{n+1} = E_{contacto}^n + \left[\sum_{i=1}^{nne} \Delta F_i^{esclavo} * \Delta dist_i^{esclavo} + \sum_{i=1}^{nnm} \Delta F_i^{maestro} \right]^{n+\frac{1}{2}}$$

Ecuación 27 Solución energía de contacto mediante FEA

Donde nne es el número de nodos esclavos y nnm es el número de nodos maestros, la energía de contacto se incrementa de tiempo n en tiempo $n + 1$ para cada contacto, ΔF_i es la fuerza que se genera entre el punto de contacto del nodo esclavo o maestro con el otro

⁵⁰ <http://www.dynasupport.com/howtos/general/contact-energy>.

nodo y $\Delta dist_i$ representa la distancia que un nodo maestro ó esclavo se movió durante el transcurso del tiempo.⁵¹

⁵¹ HALLQUIST, John. LS-DYNA theoretical manual

12. Resultados del chasis

12.1 Choque frontal

12.1.1 Calidad del enmallado

En la figura 12-1 se observa el tamaño de elementos usados en esta simulación, en la pared que va estar expuesta a colisión se refina la malla para un resultado más acertado.

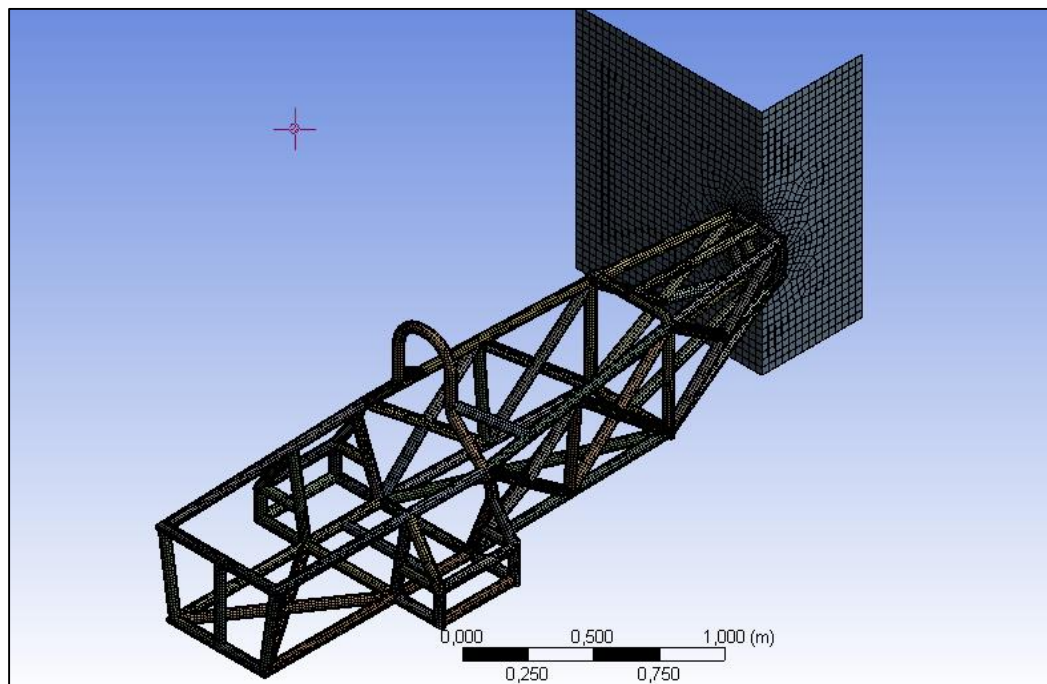


Figura: 12-1 Enmallado del chasis y la pared (Autores)

En la figura 12-2 se observa que 30313 de elementos tienen una calidad de 0.96, en promedio la calidad está por encima de 0.90

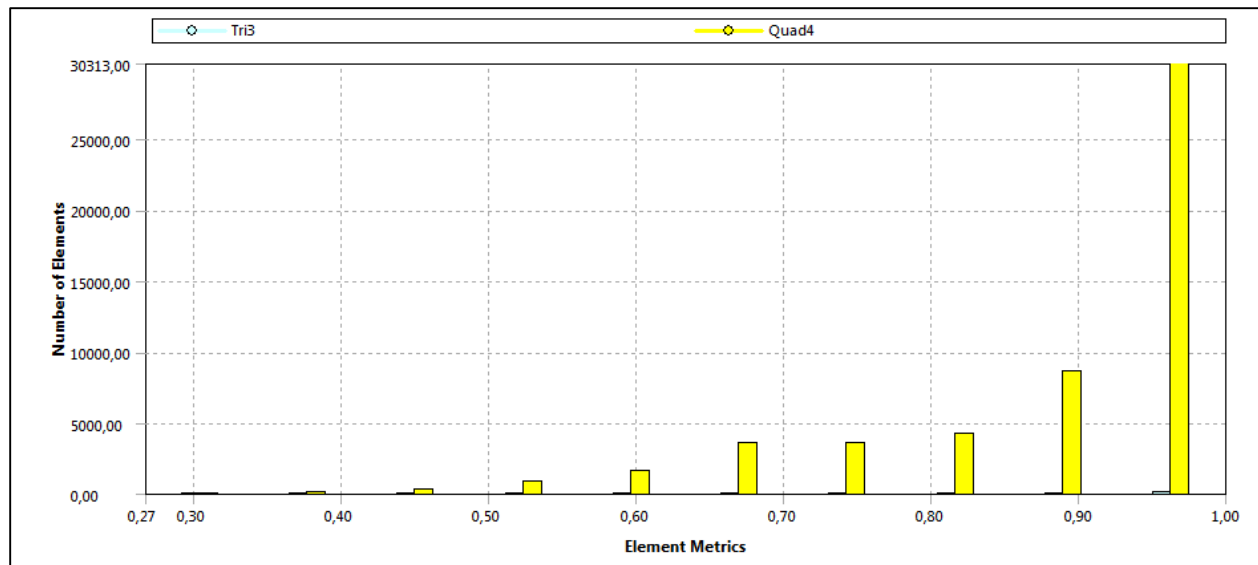


Figura: 12-2 Calidad del enmallado (Autores)

12.1.2 Visualización de contornos de tensión

Las figuras 12-3 a la 12-6 demuestran el antes y el despues del choque, a pesar de que la estructura se deforma, el habitaculo del piloto se encuentra en buenas condiciones y casi sin deformacion.

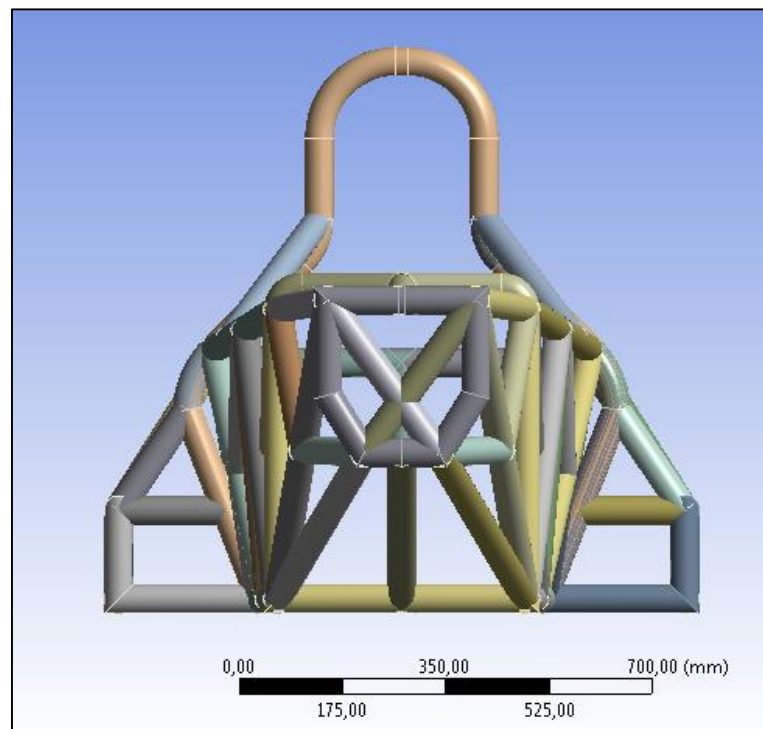


Figura: 12-4 Vista frontal antes del choque (Autores)

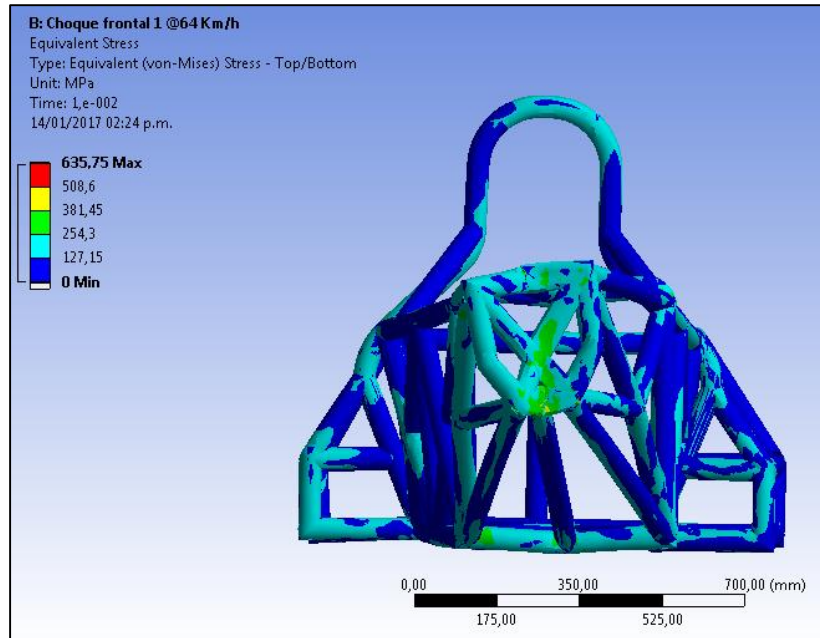


Figura: 12-5 Vista frontal después del choque (Autores)

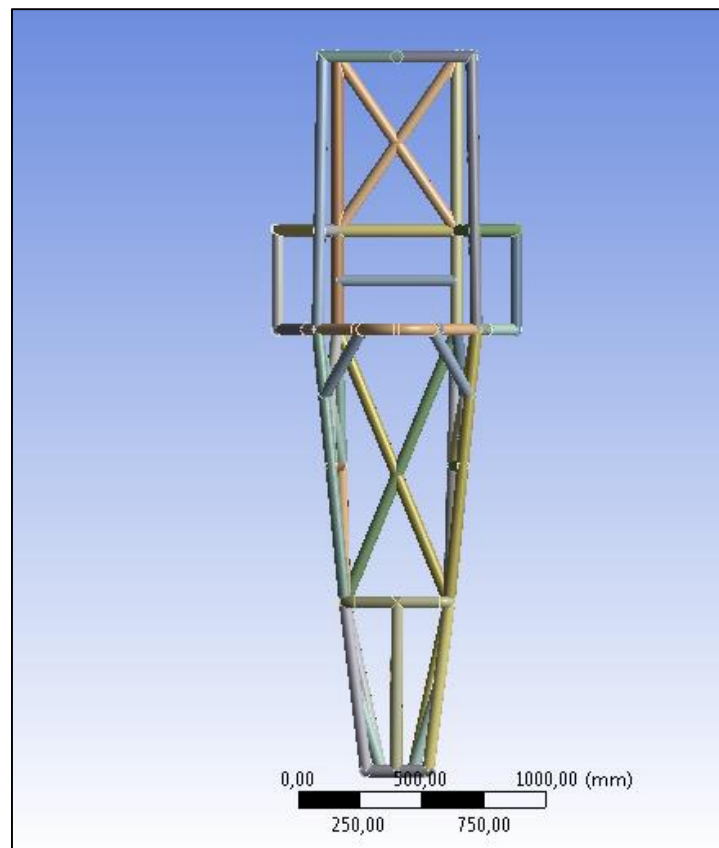


Figura: 12-6 Vista superior antes del choque (Autores)

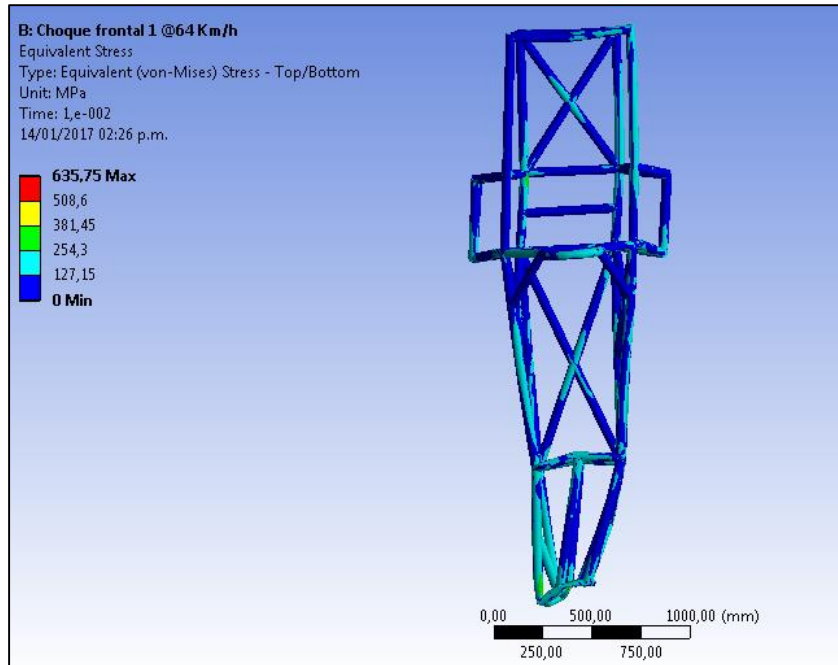


Figura: 12-7 Vista superior después del choque (Autores)

12.1.3 Generación de grafico

La grafica 12-7 demuestra que la energia cinetica se transforma en energia interna , lo cual demuestra que el tiempo de simulacion fue lo suficiente como para que sean validos los resultados.

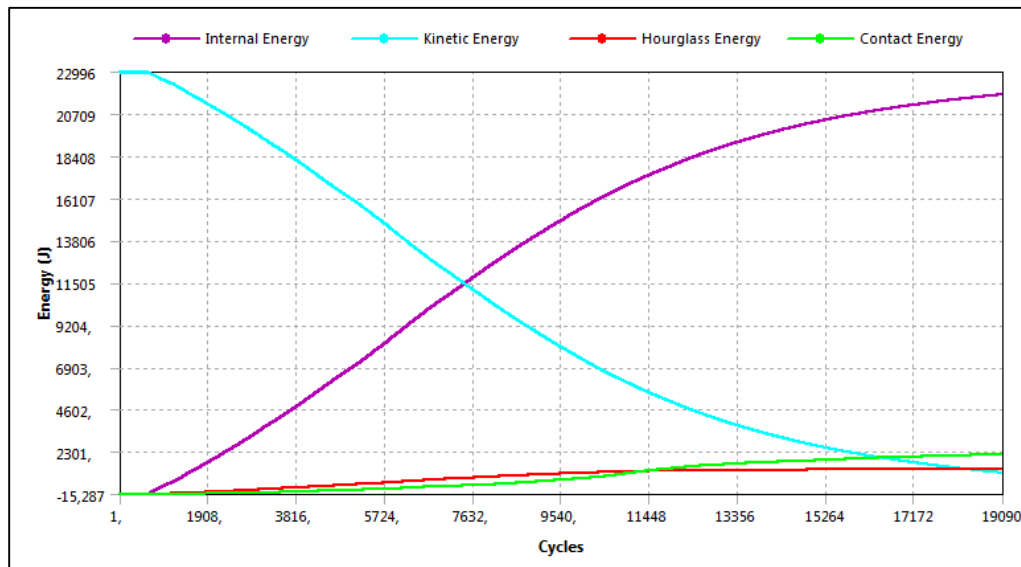


Figura: 12-8 Grafico de energía (Autores)

12.2 Choque lateral

12.2.1 Calidad del enmallado

En la figura 12-8 se observa que las curvaturas y redondeos del chasis tiene buen aspecto, lo cual hace que enmallado tenga buena calidad.

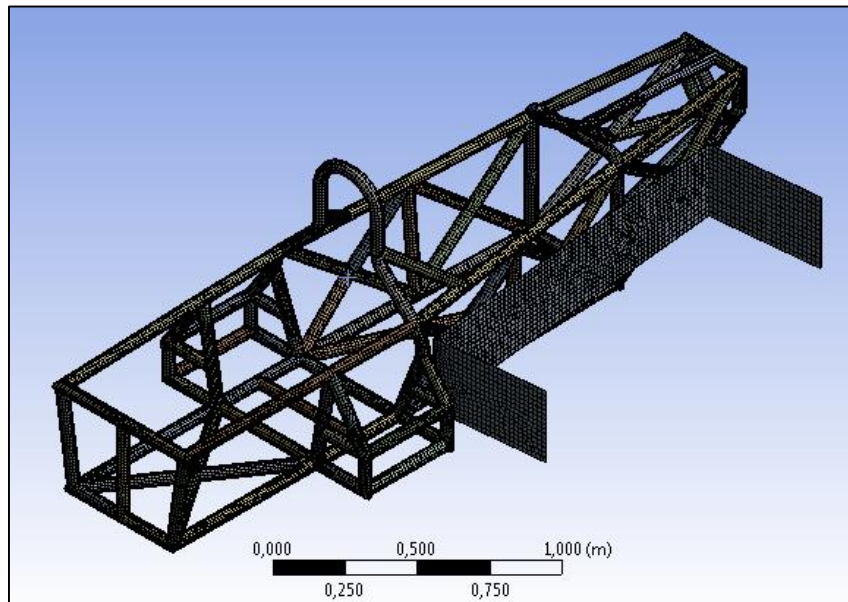


Figura: 12-9 Enmallado del chasis y la pared (Autores)

En la figura 12-9 se observa que 31998 de elementos tienen una calidad de 0.96 , en promedio la calidad de la malla es de 0.89

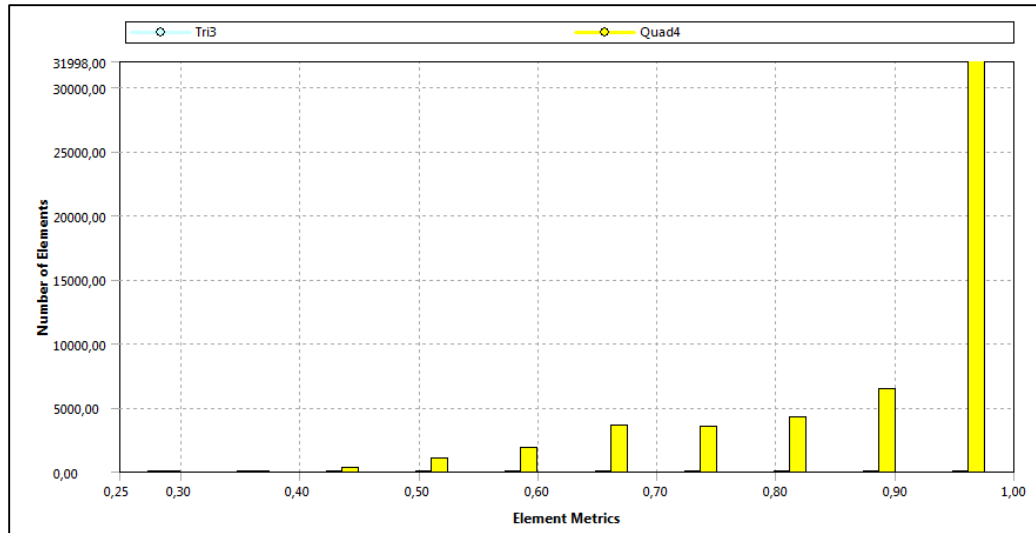


Figura: 12-10 Calidad del enmallado (Autores)

12.2.2 Visualización de contornos de tensión

Las figuras 12-10 a la 12-13 demuestran el antes y el despues del choque, se puede observar que el choque se distribuye de manera uniforme sobre la parte lateral del chasis, lo cual beneficia al habitáculo del piloto, ya que sigue manteniendo su forma.

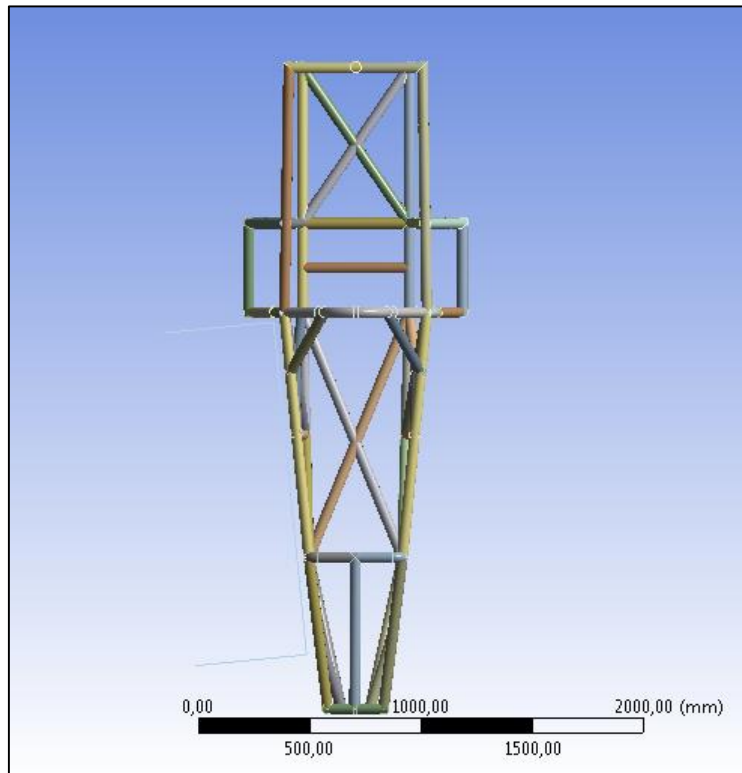


Figura: 12-11 Vista superior antes del choque (Autores)

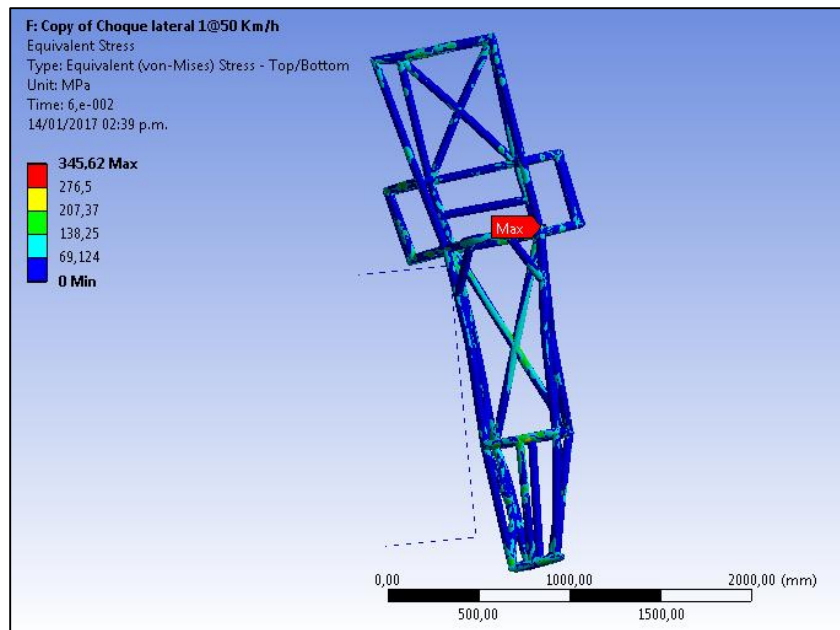


Figura: 12-12 Vista superior después del choque (Autores)

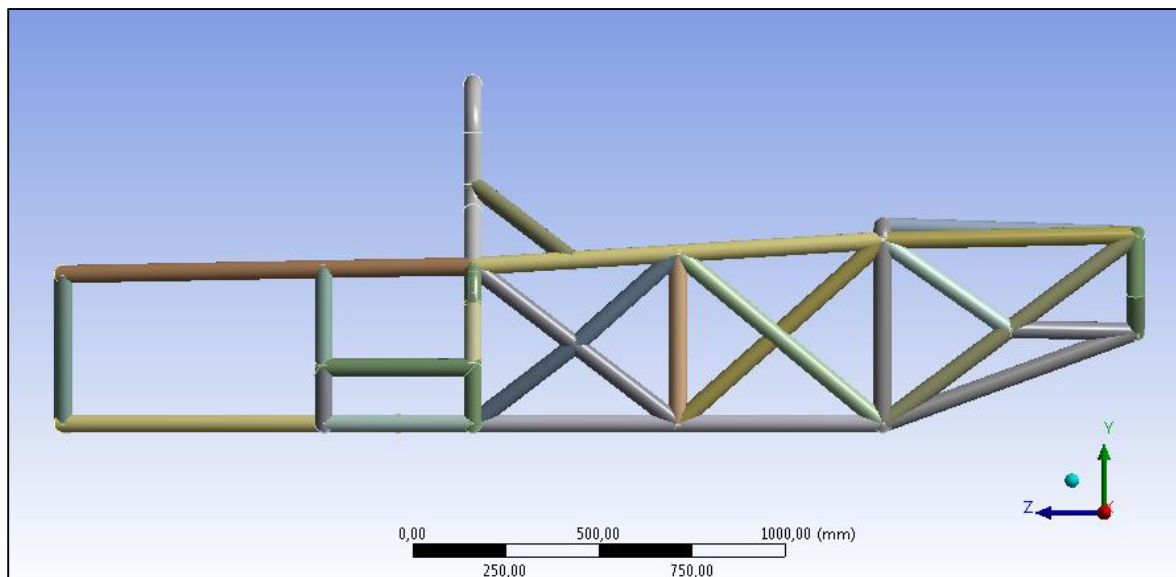


Figura: 12-13 Vista lateral antes del choque (Autores)

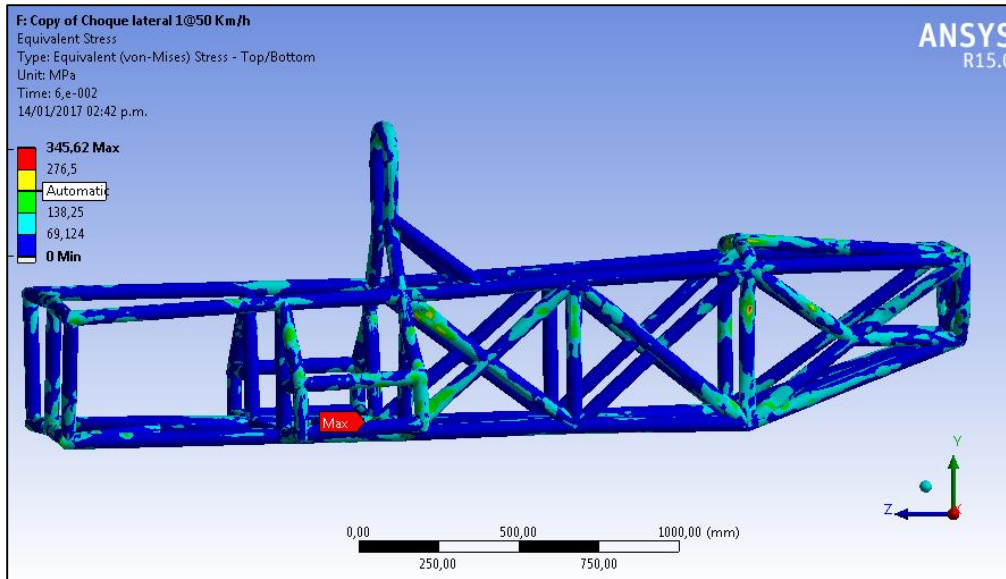


Figura: 12-14 Vista lateral después del choque (Autores)

12.2.3 Generación de grafico

La grafica 2-14 demuestra que la energia cinetica es de 14019 Julios que se transforma en energia interna , lo cual demuestra que el tiempo de simulacion fue lo suficiente como para que sean validos los resultados.

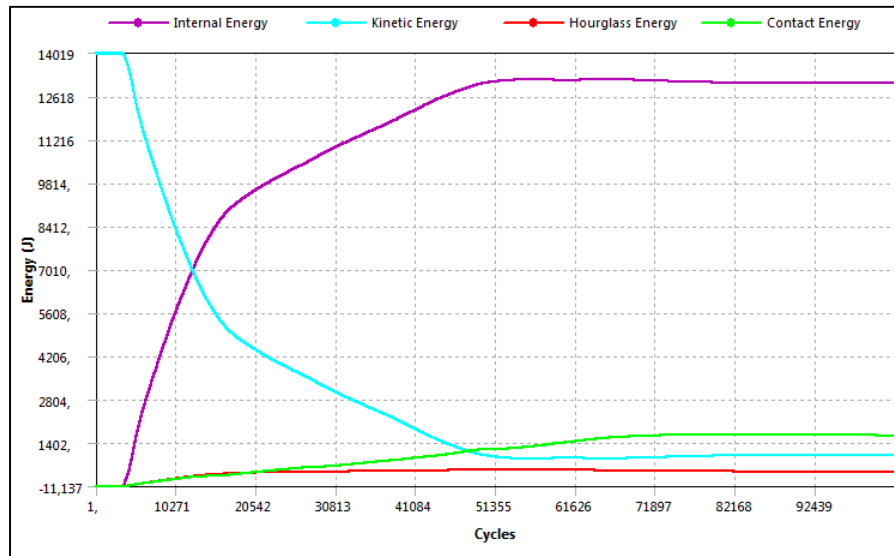


Figura: 12-15 Grafico de energía (Autores)

12.3 Choque lateral con esfera

12.3.1 Calidad del enmallado

Al igual que la gráfica 12-8 el enmallado permite observar las curvaturas del chasis y su forma, permitiendo una buena calidad de malla.

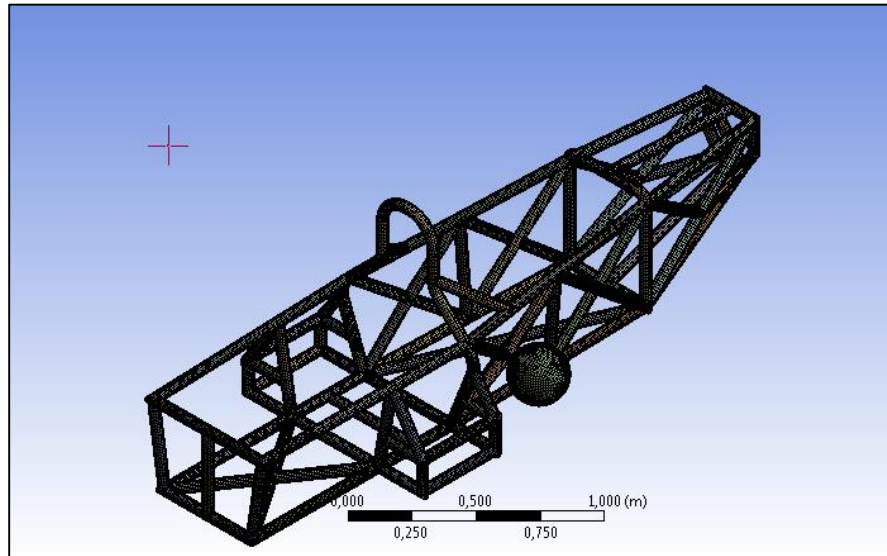


Figura: 12-16 Enmallado del chasis y la esfera (Autores)

En la figura 12-16 se observa que 50271 elementos tienen una calidad de 0.96, en promedio la calidad de esta malla es de 0,91

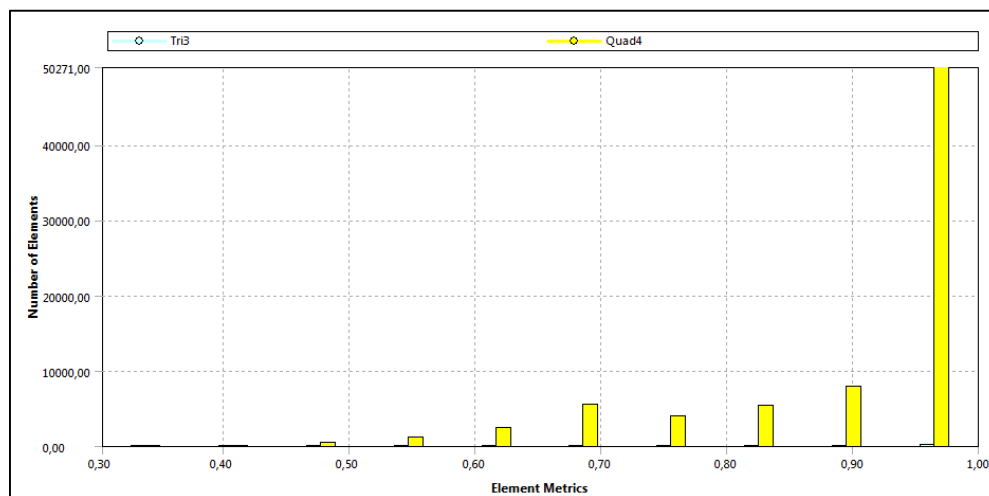


Figura: 12-17 Calidad del enmallado (Autores)

12.3.2 Visualización de contornos de tensión

Las figuras 12-17 a la 12-20 demuestran el antes y el despues del choque, se puede observar que le choque alcanza a penetrar una parte del habitaculo del piloto

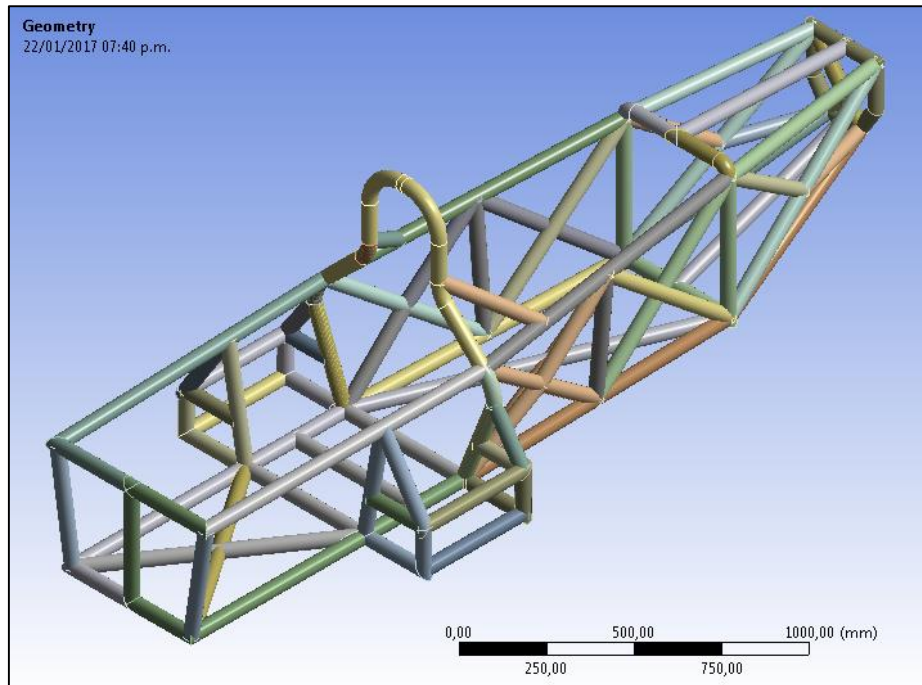


Figura: 12-18 Vista isométrica antes del choque (Autores)

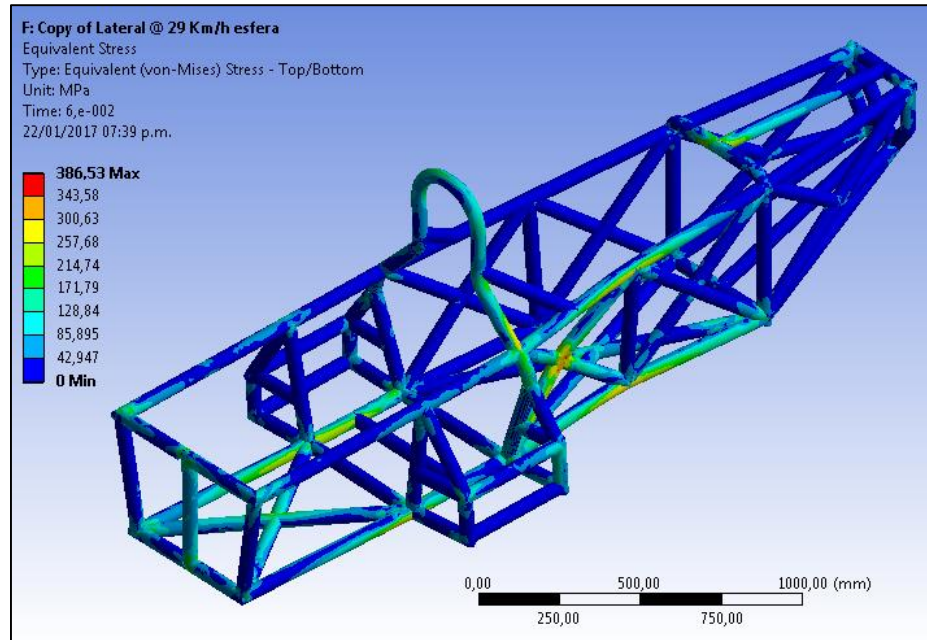


Figura: 12-19 Vista isométrica después del choque (Autores)

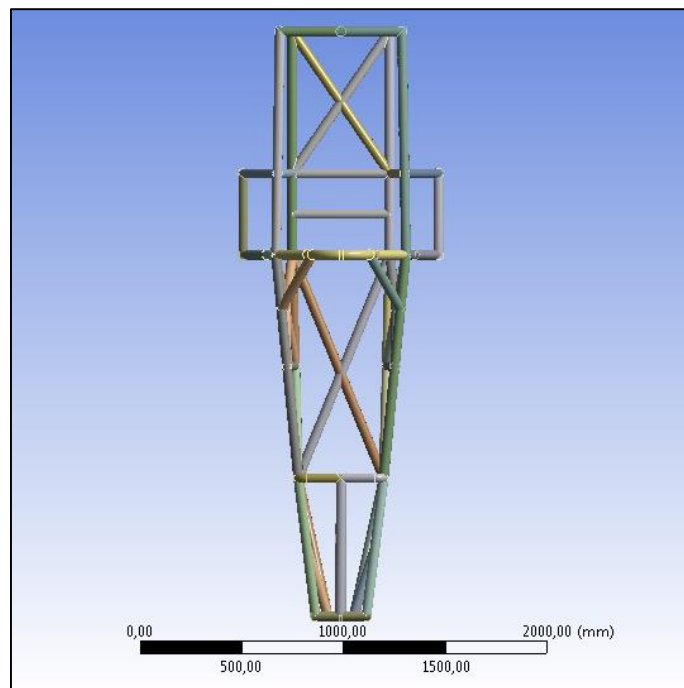


Figura: 12-20 Vista superior antes del choque (Autores)

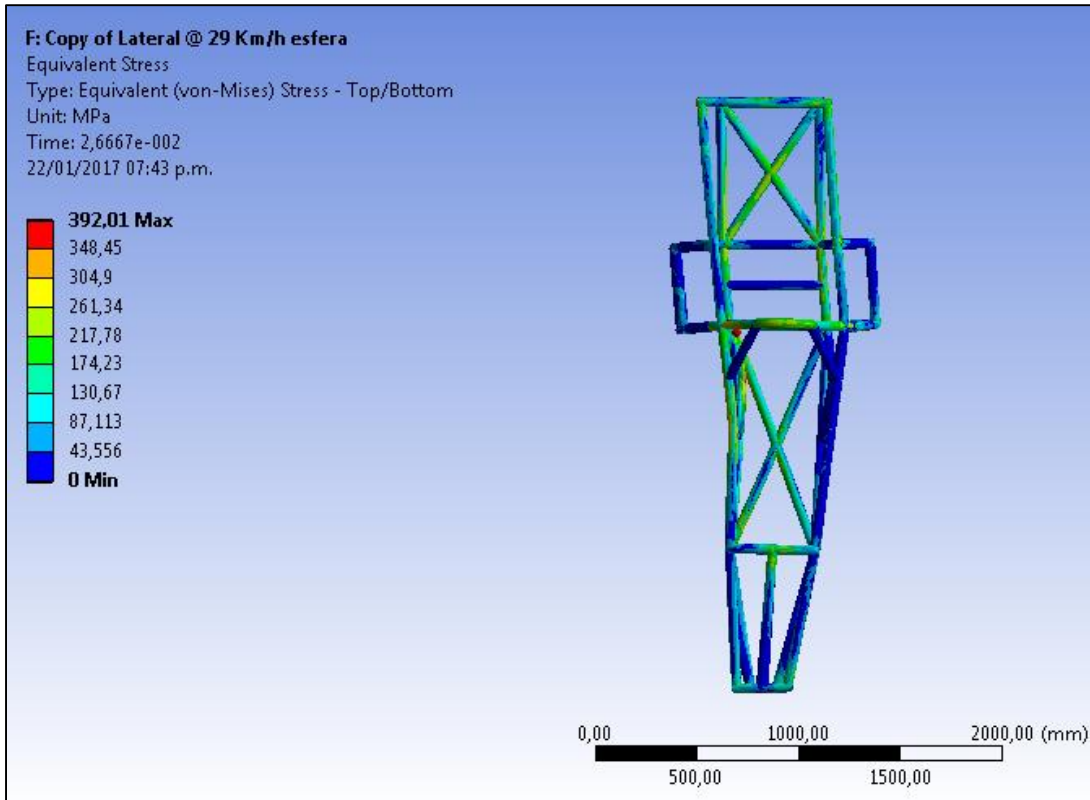


Figura: 12-21 Vista superior después del choque (Autores)

12.3.3 Generación de grafico

La grafica 12-21 demuestra que el tiempo de la simulación fue un poco más largo con respecto a las anteriores simulaciones, ya que la energía cinética vuelve a obtener energía debido a la elasticidad del material.

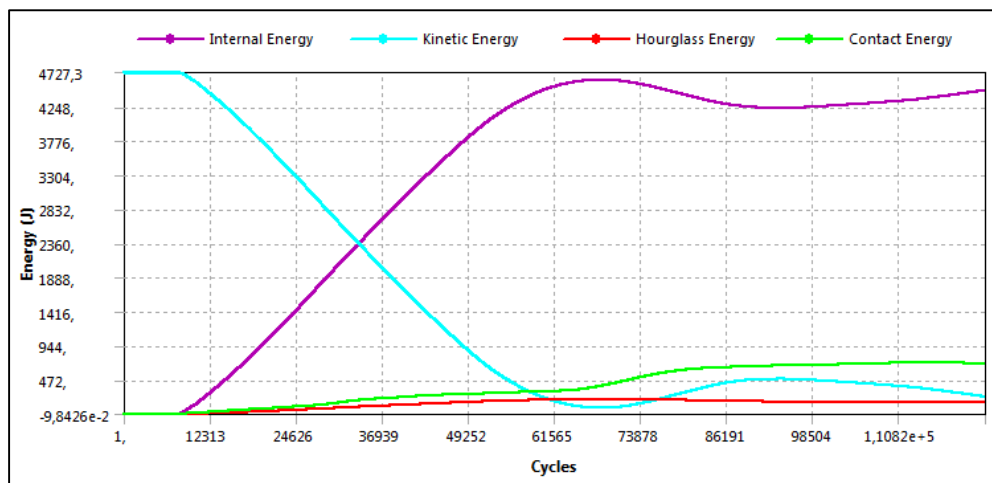


Figura: 12-22 Grafico de energía (Autores)

12.4 Volcadura

12.4.1 Calidad del enmallado

La figura 12-22 y 12-23 muestra la calidad de la malla que tiene esta simulación, 52543 elementos tienen una calidad del 0,96 y la calidad promedio es de 0,92.

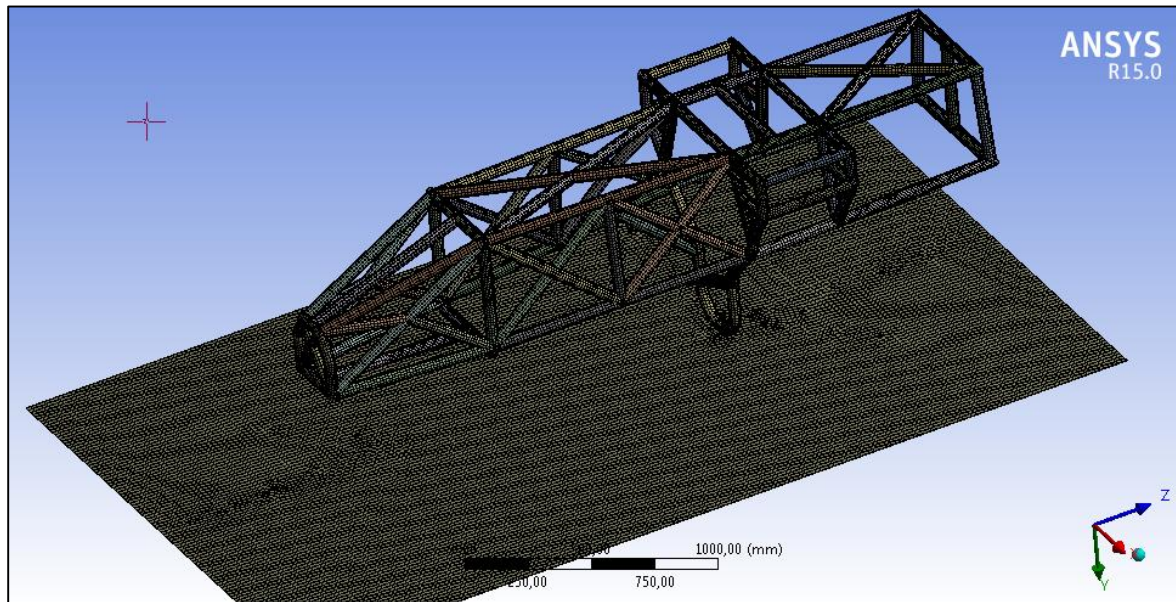


Figura: 12-23 Enmallado del chasis y el suelo (Autores)

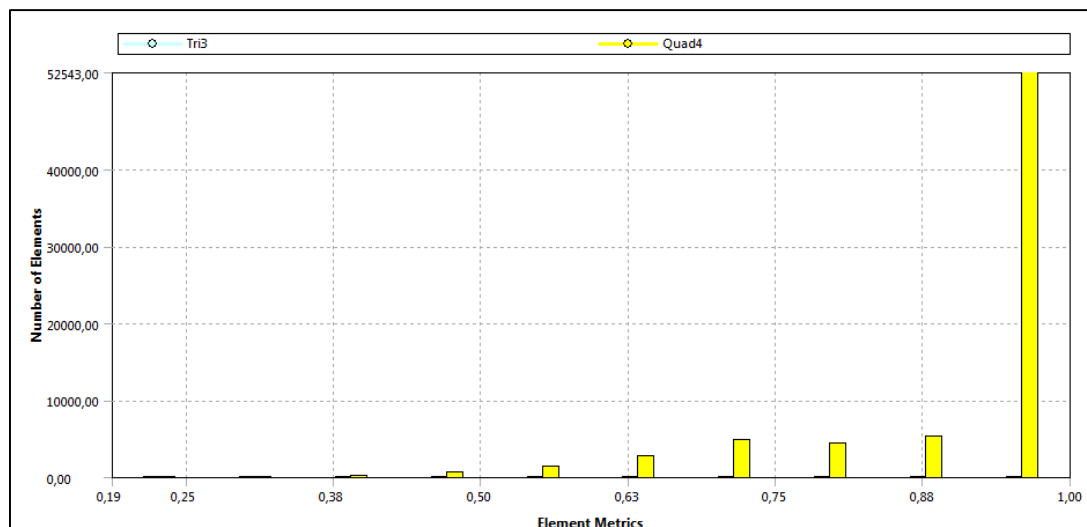


Figura: 12-24 Calidad del enmallado (Autores)

12.4.2 Visualización de contornos de tensión

Las figuras 12-24 a la 12-25 demuestran el antes y el despues del choque, se puede observar que el choque se distribuye de manera uniforme sobre todo el chasis, esto se debe a que la parte que absorbe el choque es la principal sección del chasis y es la que tiene mas conexiones con las otras tuberías.

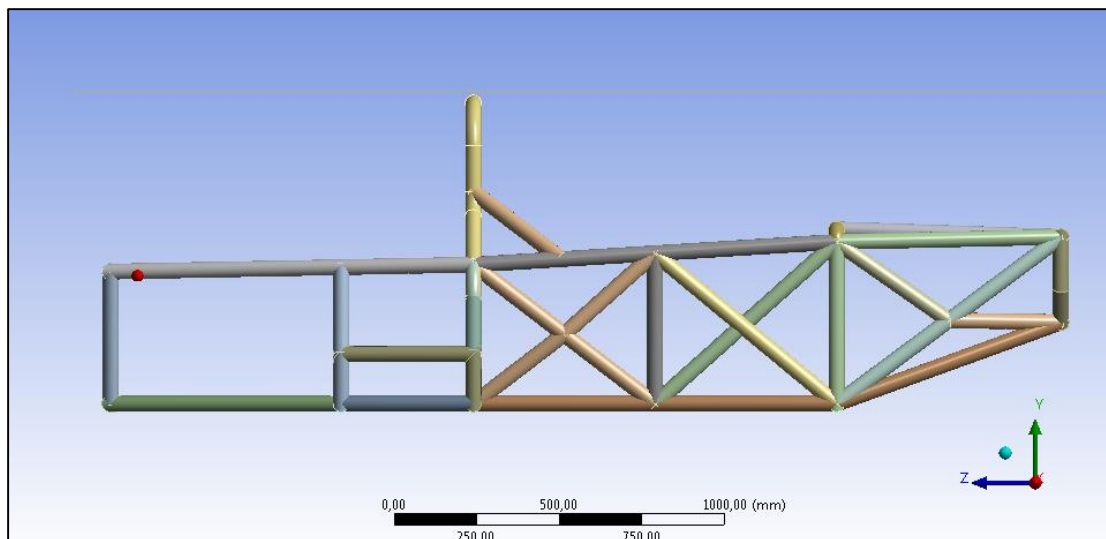


Figura: 12-25 Vista lateral antes del choque (Autores)

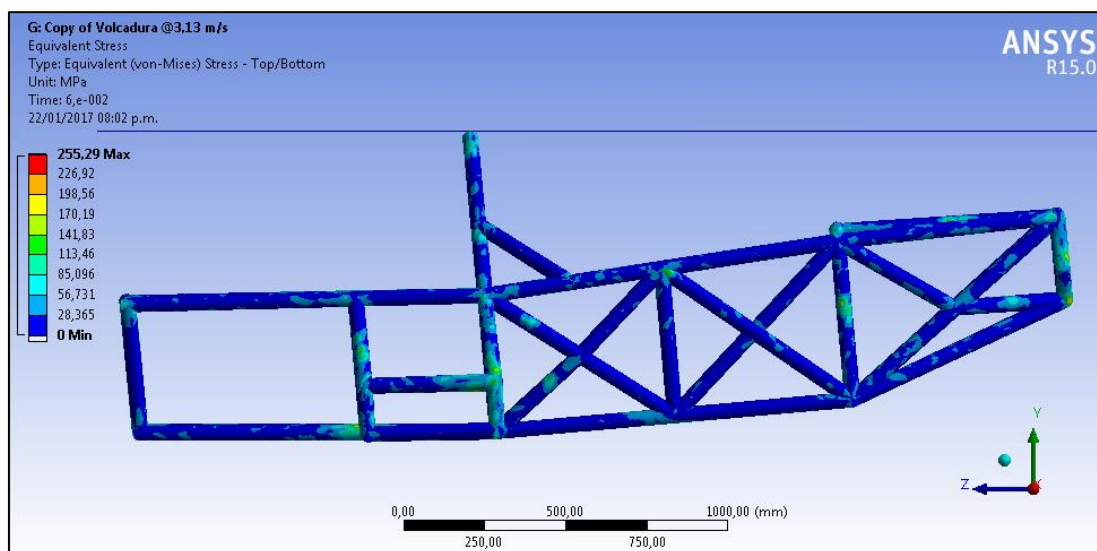


Figura: 12-26 Vista lateral después del choque (Autores)

12.4.3 Generación de grafico

La figura 12-26 demuestra que es la simulación que obtuvo menos energía cinética debido al choque, como resultado el chasis recibió muy poca deformación.

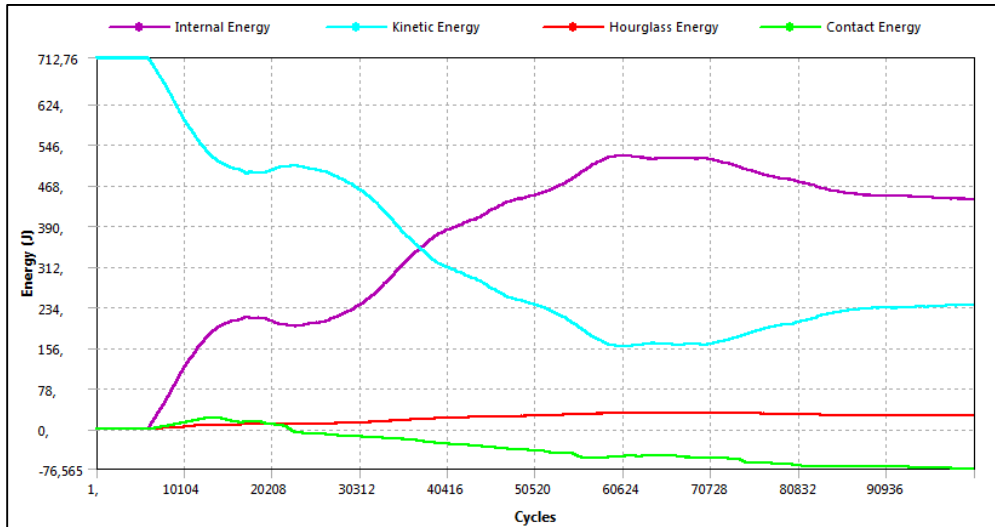


Figura: 12-27 Grafico de energía (Autores)

12.5 Resultados

Las siguientes tablas a continuación muestran los resultados de las simulaciones.

SITUACION	CALIDAD MALLA PROMEDIO	MIN.TAMAÑO ELEMENTO (mm)	MAX.TAMAÑO ELEMENTO (mm)	NO. ELEMENTOS	NO. NODOS
FRONTAL 1	0,89454422	7,06	35	53139	54109
FRONTAL 2	0,90722876	10	47	50063	51034
LATERAL 1	0,89360224	6,5	32	51674	52682
LATERA 2	0,89079841	6	20	53975	52880
L.ESFERA 1	0,89360224	9,42	47	50073	50962
L.ESFERA 2	0,91321133	5	10	77056	78131
VOLCADURA 1	0,90403801	6,5	32	59714	60809
VOLCADURA 2	0,9222036	8	20	71889	73086

Tabla 8 Resultados del enmallado

En la tabla 9, la columna de % error stress demuestra el error porcentual que existió entre simulación las dos simulaciones presentadas en cada caso.

SITUACION	MAX. STRESS (MPa)	DELTA ELEMENTOS	DELTA NODOS	% Error STRESS	MASA (Kg)
FRONTAL 1	445,75	3.076	3.075	1,79%	322
FRONTAL 2	437,75				
LATERAL 1	336,1	2.301	198	2,83%	
LATERAL 2	345,6				
L. ESFERA 1	378	26.983	27.169	2,12%	
L. ESFERA 2	386				
VOLCADURA 1	253,55	12.175	12.277	0,57%	
VOLCADURA 2	255				

Tabla 9 Resultados de esfuerzo de tensión en el chasis

SITUACION	VELOCIDAD INICIAL (m/s)	MAX. ENERGIA CINETICA (J)	MAX. ENERGIA INTERNA (J)	MAX. HOURGLASS (J)	MAX. ENERGIA CONTACTO (J)	ENERGIA CONTACTO > 10 % E. INTERNA MAXIMA
FRONTAL1	17,7	22996	22081	1840	2301	CUMPLE
FRONTAL2		22996				
LATERAL1	13,8	14016	13702	823	1682	CUMPLE
LATERAL2		14019				
L. ESFERA1	8,05	4730	4631	283	755	CUMPLE
L.ESFERA2		4727				
VOLCADURA1	3,13	712	533	39	76	CUMPLE
VOLCADURA2		712				

Tabla 10 Resultados en forma de energías

12.6 Comparación resultados teóricos vs simulados

12.7 Energía cinética

SITUACION	MASA (Kg)	VELOCIDAD INICIAL (m/s)	MAX.ENERGIA CINETICA(J) TEORICO	MAX.ENERGIA CINETICA(J) SIMULADA	% ERROR MAX
FRONTAL	322	17,7	25220	22996	8,82%
LATERAL		13,8	15330	14019	8,55%
L. ESFERA		8,05	5217	4730	9,33%
VOLCADURA		3,13	789	712	9,72%

Tabla 11 Comparación de la energía cinética teórica vs simulada

12.8 Selección de material

Para seleccionar el material se usa la siguiente tabla, la cual muestra las tensiones promedio a la que fue sometido el chasis con diferentes tipos de impactos, y en lugares estratégicos.

	STRESS PROMEDIO (MPa)
FRONTAL	254
LATERAL	207
L. ESFERA	300
VOLCADURA	245

Tabla 12 Tensiones promedio en el chasis

Para ello seleccionamos el valor más alto para usarlo como tensión admisible

En la siguiente tabla⁵² se puede obtener un valor del factor de seguridad a utilizar para después encontrar el esfuerzo último admisible.

CONOCIMIENTO CARGA		CONOCIMIENTO ESFUERZO	CONOCIMIENTO ENTORNO	CONOCIMIENTO MATERIAL	FACTOR SEGURIDAD
1	con precisión	con precisión	controlables condiciones	muy conocido	1.25 - 1.5
2	determinadas fácilmente	determinado fácilmente	aproximado constante	muy conocido	1.5 - 2.0
3	determinable	determinable	ordinario	Promedio	2.0 - 2.5
4	promedio	promedio	promedio	menos probado	2.5 - 3.0
5	promedio	promedio	promedio	no probado	3.0 - 4.0
6	incierto	incierto	incierto	poco conocido	3.0 - 4.0

Tabla 13 Factor de seguridad

Según la tabla, el valor que más se ajusta y se debe utilizar es el factor de seguridad de **1.25**

Lo siguiente es determinar el valor del esfuerzo último mediante la siguiente ecuación.

$$\sigma_{ultimo} = Fs * \sigma_{admissible}$$

Ecuación 28 Esfuerzo ultimo

$$\sigma_{ultimo} = 1.25 * 300MPa = 375MPa$$

Con este valor, se selecciona un material que tenga un esfuerzo último mayor a **375 MPa**.

⁵² RODRIGUEZ, José Luis Cortizo, Diseño de maquinaria industrial. p28.

AISI/SAE	Tension de rotura (Mpa)	Fluencia (Mpa)
1008	340	285
1010	365	305
1012	370	310
1015	385	325
1016	420	350
1017	405	340
1018	440	370
1019	455	379
1020	420	350

Tabla 14: Propiedades mecánicas del acero al carbón (Bhaskaran, s.f.)

13. Resultados carrocería

Terminado el proceso de generación de las mallas, se importan a Fluent para realizar la simulación. Las condiciones bajo las cuales se realizaron todas las simulaciones son:

- Se inicia Fluent dejando como parámetro de precisión 3D single precisión. En las opciones de procesamiento se elige paralelo que es para una maquina local, 4 procesadores que son los que están disponibles en este proyecto. Como tipo de solver se selecciona Pressure-Based Solver (predeterminado) en modo Steady y formulación de velocidad absoluta (predeterminado).
- Se selecciona el modelo de turbulencia Spalart- Allmaras como se mencionó anteriormente.
- Se definen la densidad y viscosidad del fluido (aire).
- Se definen las condiciones de contorno.
- Para la solución de los campos presión-velocidad se utiliza el esquema Coupled. Para la discretización espacial de los gradientes Least Squares Cell Based, se utiliza el esquema second order para la presión, momento y viscosidad turbulenta.
- Se definen como parámetros a medir los residuos, los coeficientes c_d y c_l tomando como referencia el área frontal del monoplaza.
- Se inicia la simulación con el método Hybrid Initialization para facilitar la convergencia inicial.
- Se ingresa el número de iteraciones (640) y se comienza con la simulación.

MODELO CON CARENADOS			
MALLA	No Elementos	cd	Tiempo (Horas)
1	4511172	0,71905	52
2	4706424	0,72115	48
3	10623039	0,70594	190
4	11566744	0,69942	196
MODELO SIN CARENADO			
1	4461420	0.73180	120
2	4666463	0.73689	125
3	6382554	0.73149	150

Tabla 15 Resultados y tiempo empleado para cada malla.

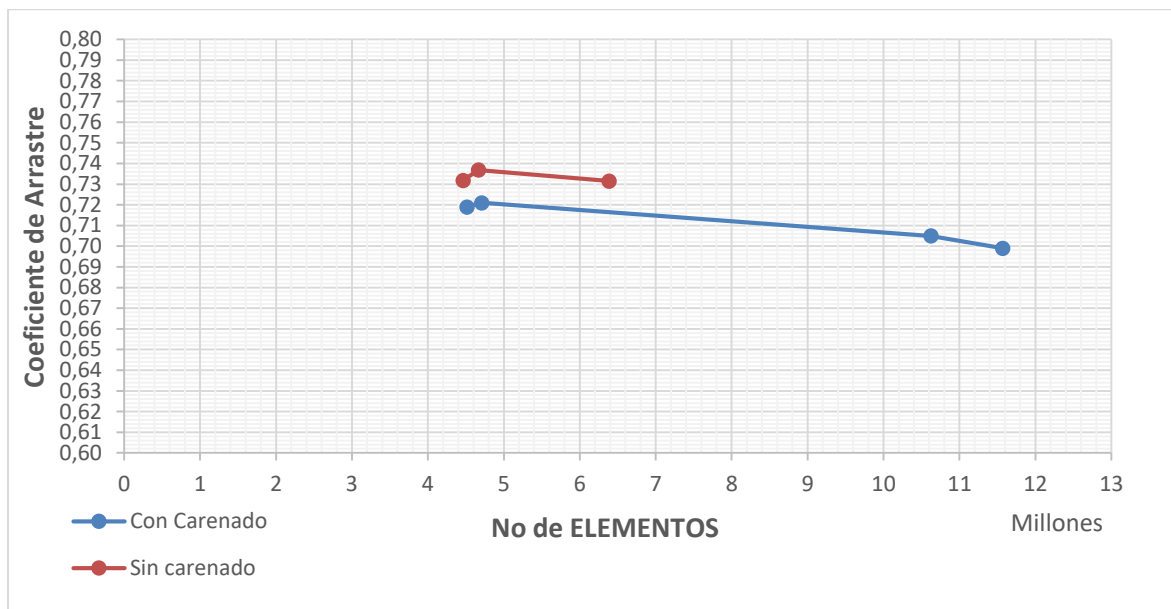


Figura: 13-1 Cd vs No elementos para cada modelo (Autores)

13.1 Resultados para las mallas con carenados

13.1.1 Malla 1

Esta simulación comienza a estabilizarse a partir de la iteración 350 como lo muestra la figura 13-2 al descender a $1e-05$.

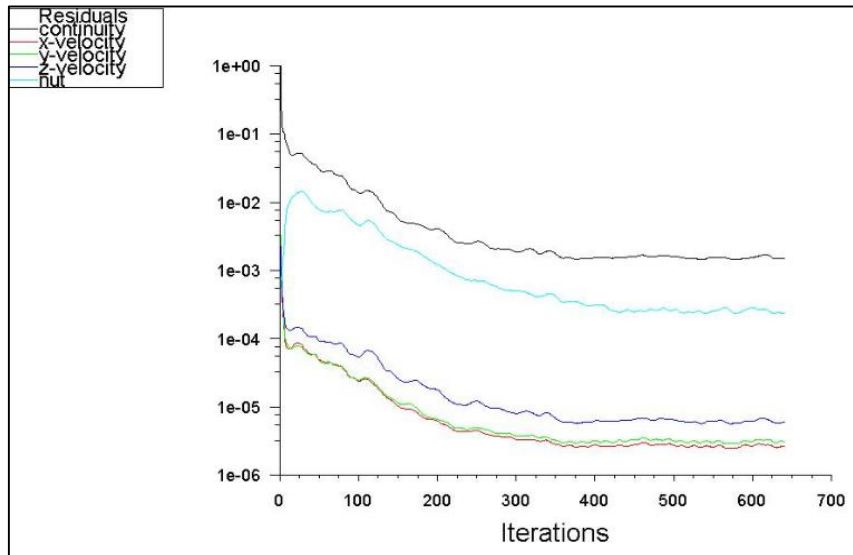


Figura: 13-2 Residuos (Autores)

El coeficiente de arrastre comienza a oscilar ligeramente de 0.720121 en la iteración 350 hasta finalmente llegar al resultado final de 0.71905 como lo muestra la Figura: 13-3.

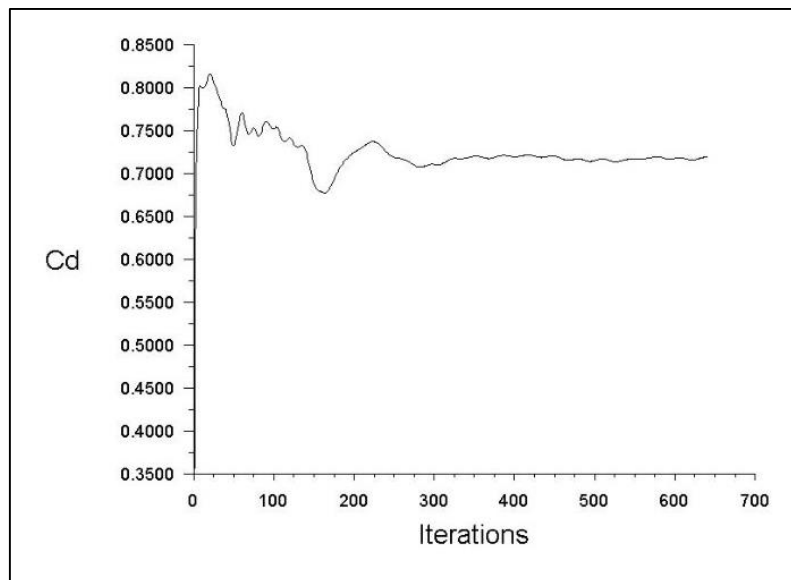


Figura: 13-3 Coeficiente de arrastre. (Autores)

La Figura: 13-4.muestra el coeficiente de sustentación se estabiliza a partir de la iteración 450 con un valor de 0.546056 hasta finalmente llegar a 0.548998.

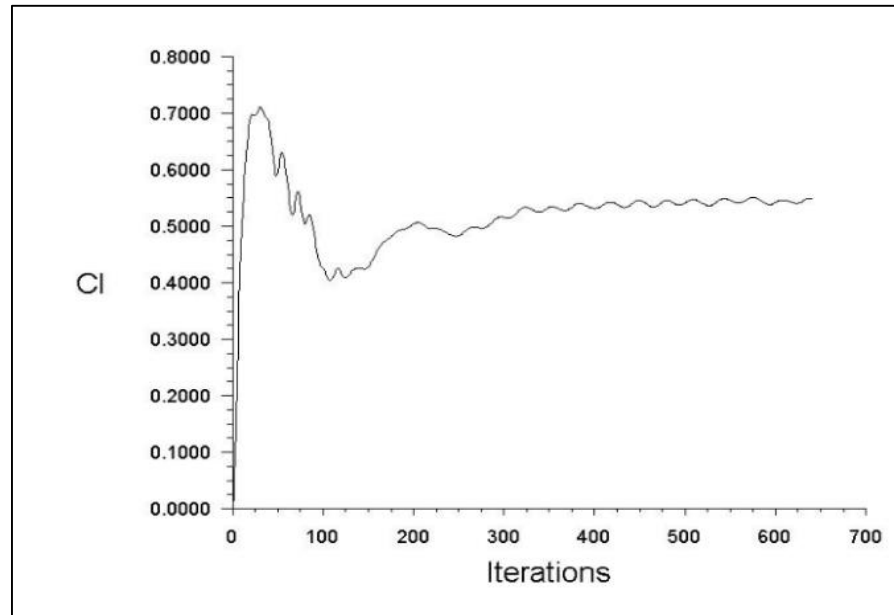


Figura: 13-4 Coeficiente de sustentación (Autores)

La Figura: 13-3 y 13-4 se observa que la presión máxima se da en zonas como la punta, las tomas de aire (superior y laterales) y las ruedas delanteras alcanzando un valor máximo para esta simulación de 767.10 Pa

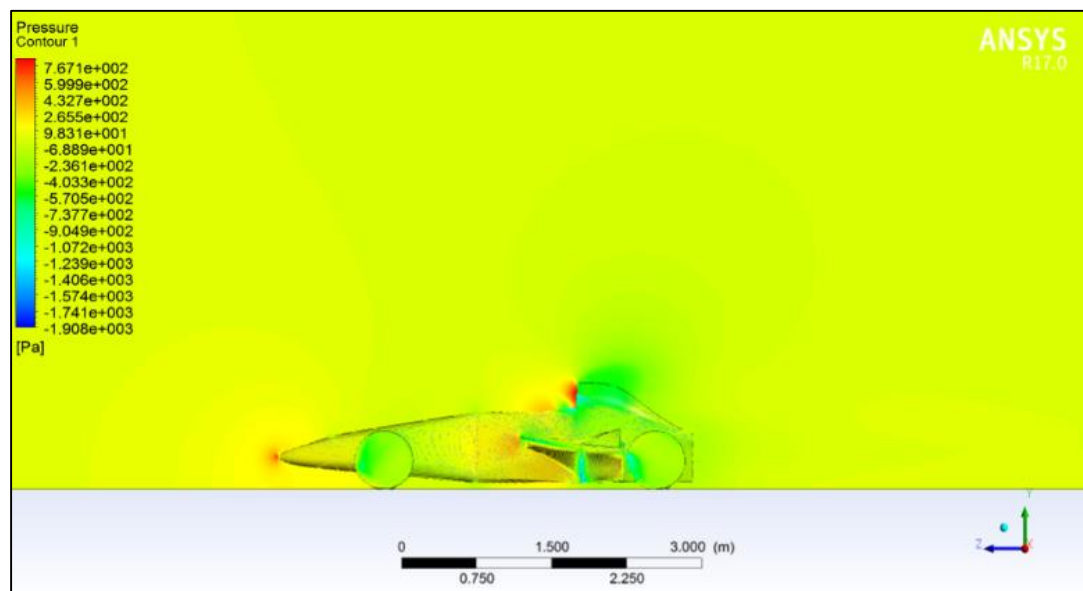


Figura: 13-5 Vista lateral del contorno de presiones en el plano de simetría del monoplaza. (Autores)

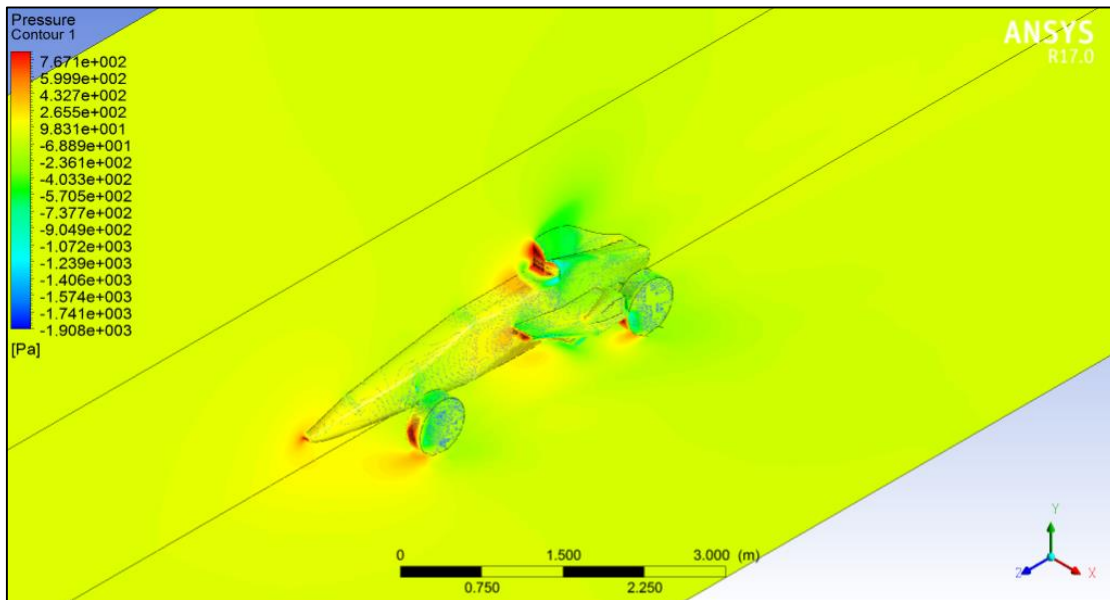


Figura: 13-6 Vista isométrica del contorno de presiones en el plano de simetría del monoplaza. (Autores)

En la Figura 13-7 se visualiza la generación de zonas de baja presión al borde de las tomas de aire alcanzando un valor de -1125 Pa debido al incremento de la velocidad en esta parte del vehículo.

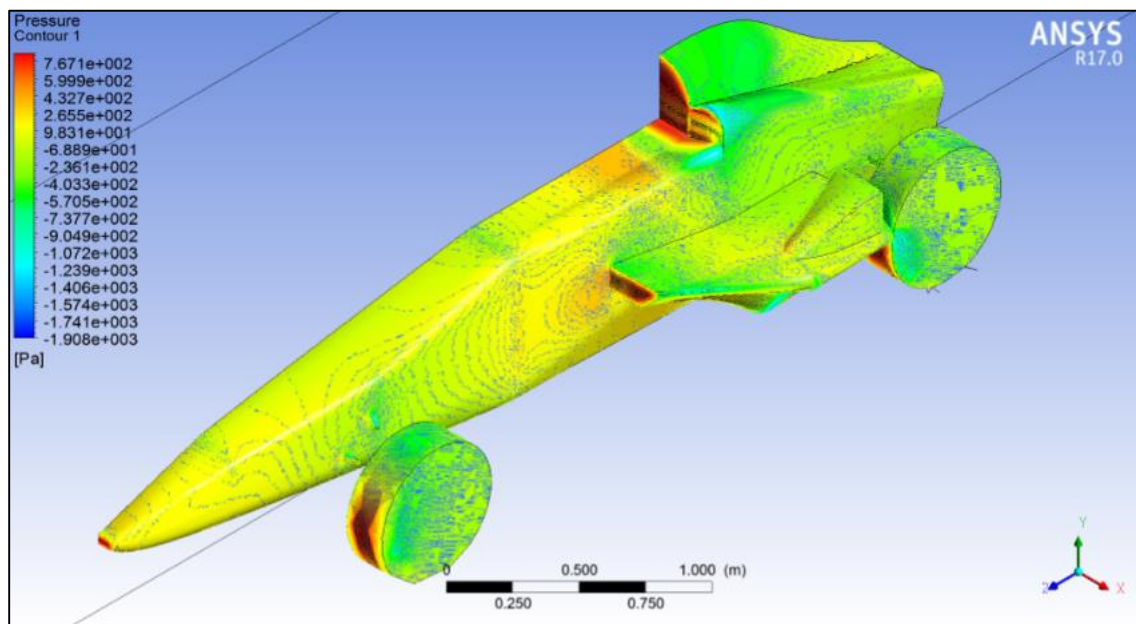


Figura: 13-8 Vista isométrica del contorno de distribución de presión estática. (Autores)

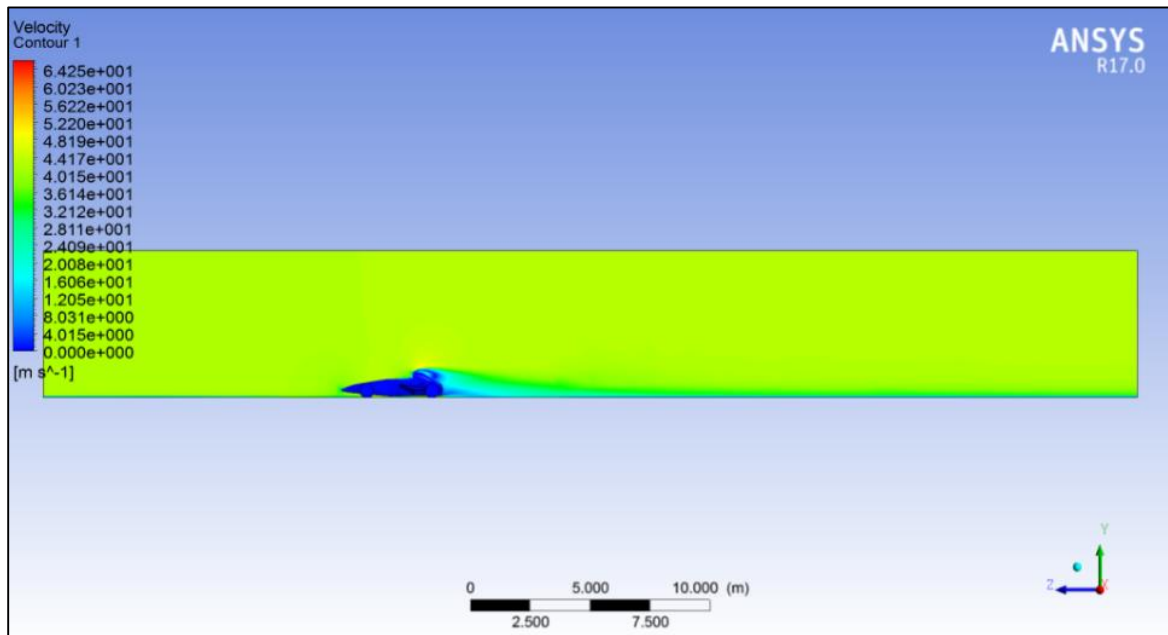


Figura: 13-9 Contornos de velocidad. (Autores)

La Figura 13-9 muestra la velocidad máxima que se da sobre la toma de aire ubicada en la parte superior del vehículo con un valor de 51.13 m/s y con un valor mínimo en la estela de la parte posterior cercano a los 4 m/s.

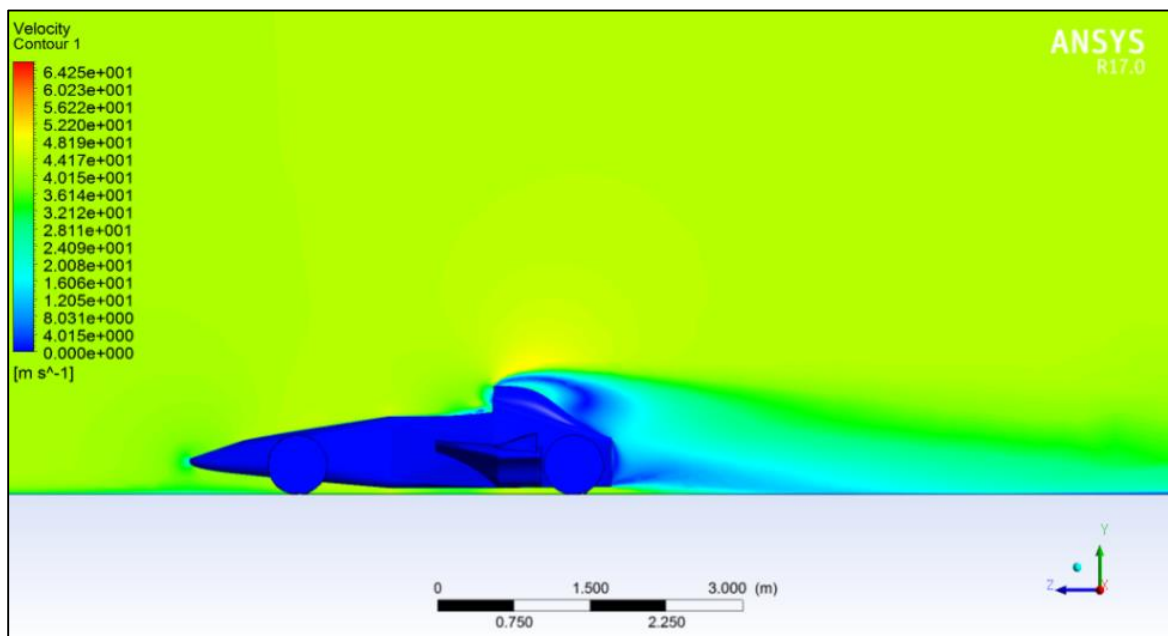


Figura: 13-10 Contornos de velocidad. (Autores)

13.1.2 Malla 2

A diferencia de la malla 1, la estabilidad se logra a partir de la iteración 420 que es cuando los residuos se estabilizan y alcanzan el valor de $1e-05$ acorde a la figura 13-10.

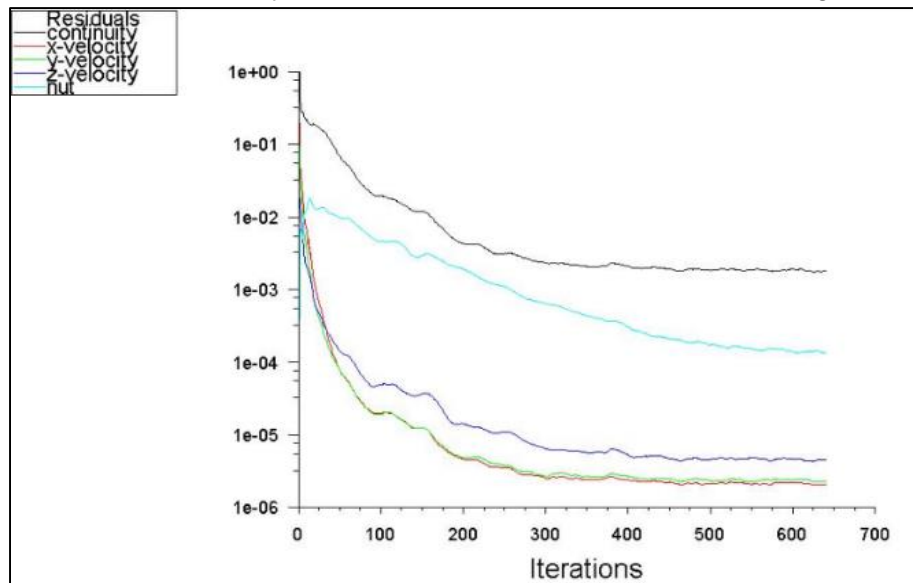


Figura: 13-10 Residuos (Autores)

El coeficiente de arrastre se mantuvo en un valor cercano a 0.724961 disminuyendo finalmente en la iteración 640 a 0.72115 acorde a la figura 13-11.

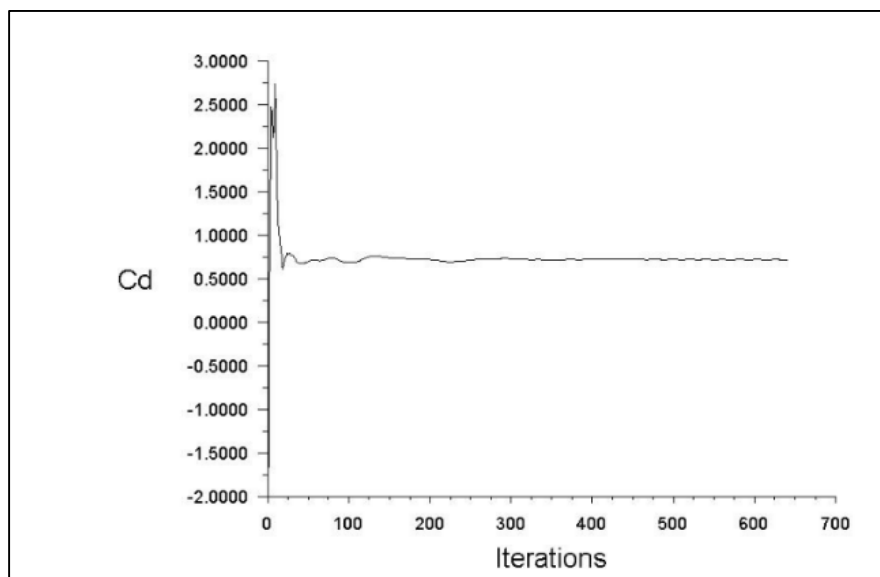


Figura: 13-11 Coeficiente de arrastre. (Autores)

Aunque el coeficiente de sustentación para esta simulación comienza en 7.3969 y se mantiene durante las primeras 30 iteraciones con valores superiores a la unidad, descende y a partir de la iteración 130 alcanza un valor cercano a 4.96393. La estabilidad se da después de la iteración 420 logrando un valor final de 0.548196 acorde a la figura 13-12.

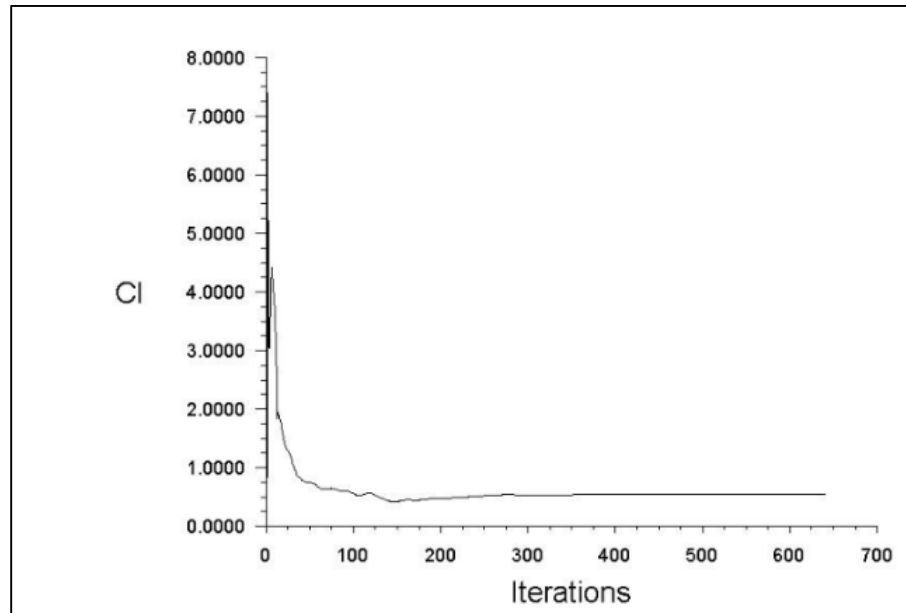


Figura: 13-12 Coeficiente de sustentación (Autores)

Los contornos de presión siguen el mismo patrón que para la simulación anterior. La variación se da levemente en los valores (presión máxima de 744.70 Pa) más las zonas de cambio siguen siendo las mismas acorde a la figura 13-11 y 13-12.

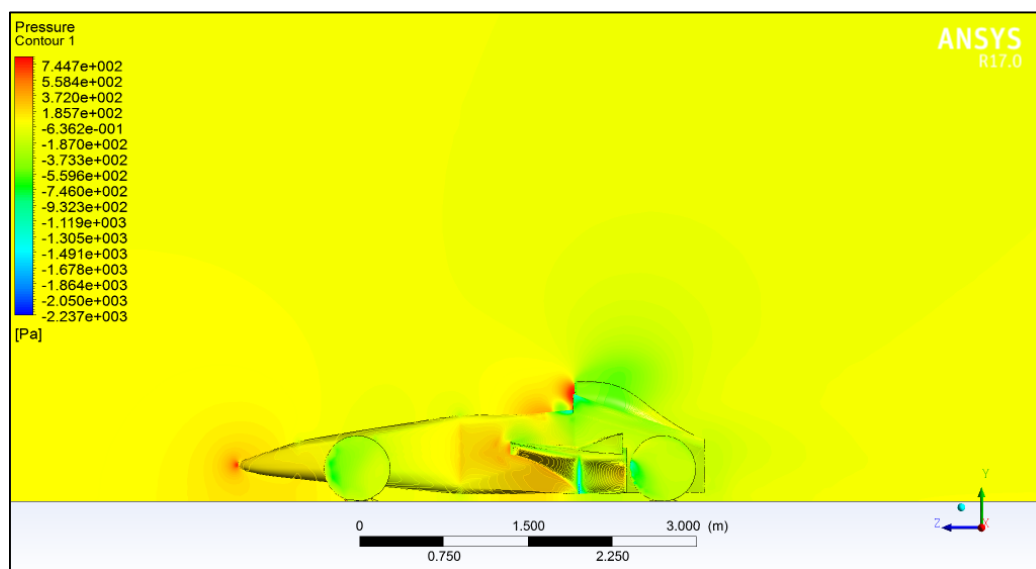


Figura: 13-13 Contorno de presión en el plano de simetría. (Autores)

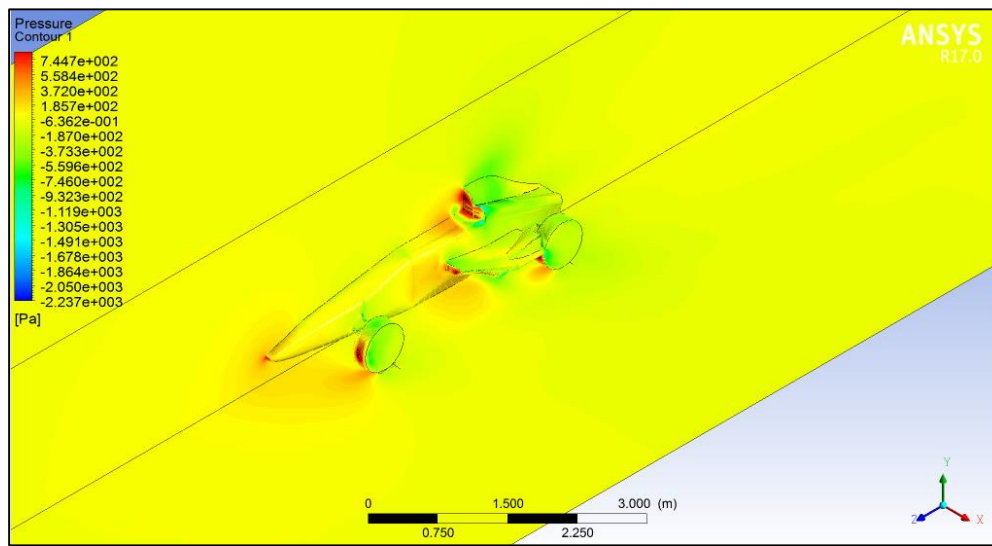


Figura: 13-14 Contornos de presión estática. (Autores)

Esta vez las zonas de baja presión alcanzan un valor aproximado de -1305 Pa en las mismas zonas de la simulación anterior, nuevamente debido al incremento de la velocidad. (Figura: 13-15).

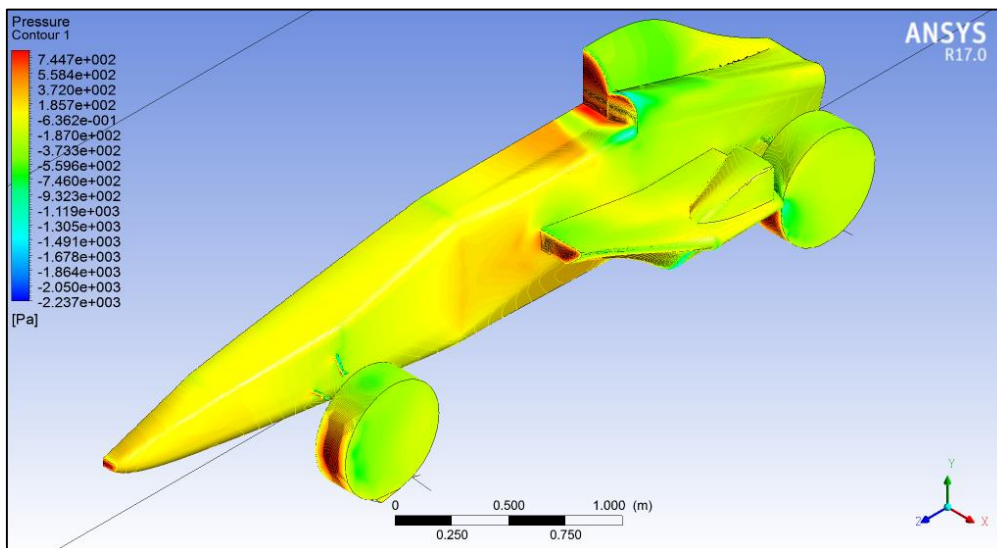


Figura: 13-15 Contornos de presión estática. (Autores)

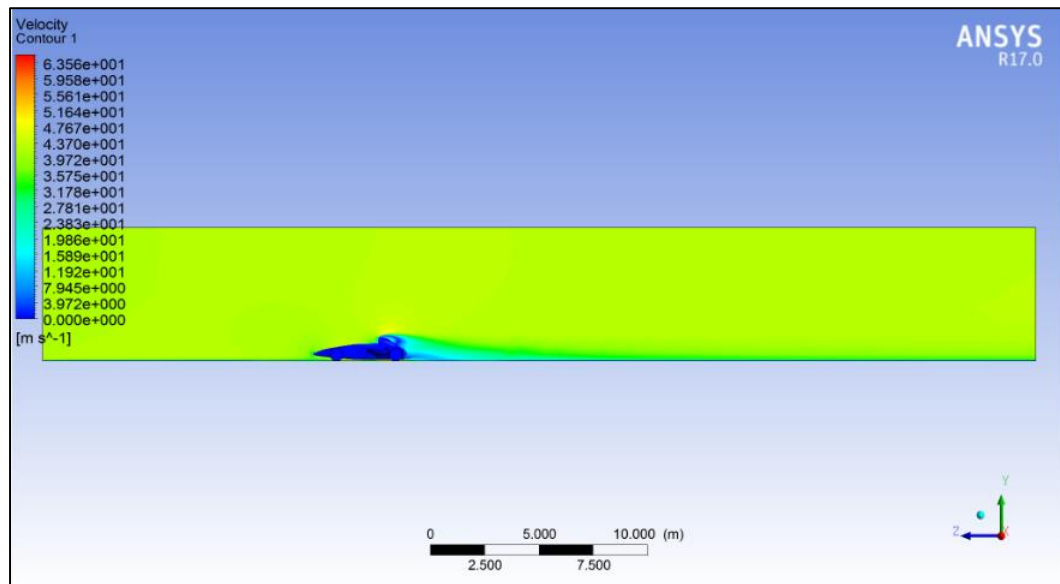


Figura: 13-16 Contornos de velocidad. (Autores)

Nuevamente la velocidad máxima se da sobre la toma de aire ubicada en la parte superior incrementando ligeramente (51.64 m/s). En la estela del vehículo la velocidad aumenta 1 m/s con respecto al valor de la simulación anterior (Figura: 13-17).

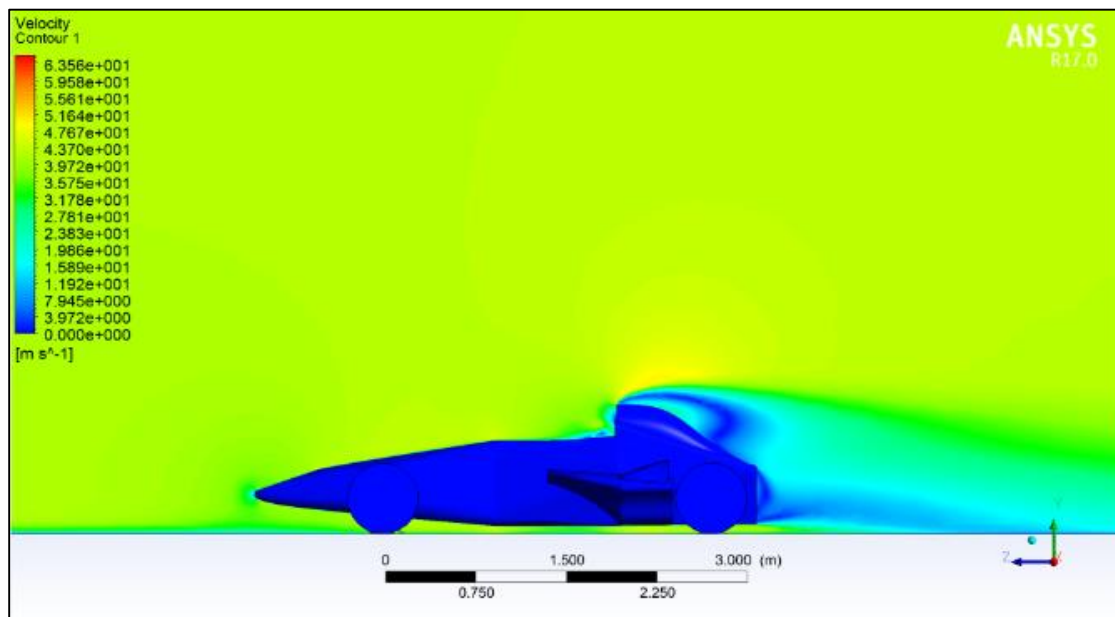


Figura: 13-18 Contornos de velocidad. (Autores)

13.1.3 Malla 3

Para la tercera simulación, a partir de la iteración 275 los residuos comienzan a descender y posteriormente se estabilizan alcanzando el parámetro deseado. (Figura 13-18).

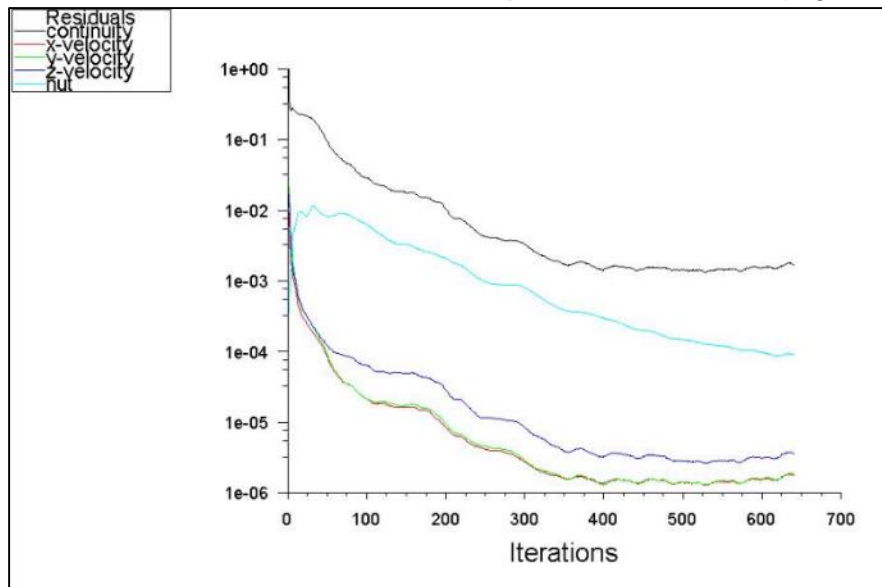


Figura: 13-18 Residuos (Autores)

El coeficiente de arrastre para esta simulación a partir de la iteración 275 es de aproximadamente 0.70045. Finalmente, para la iteración 640 el valor es de 0.70594 (Figura: 13-19). El coeficiente de sustentación se mantuvo en un valor cercano a 0.59918 para esa misma iteración, logrando estabilizarse a partir de la 327 y llegando a un valor final de 0.635542 (Figura: 13-20).

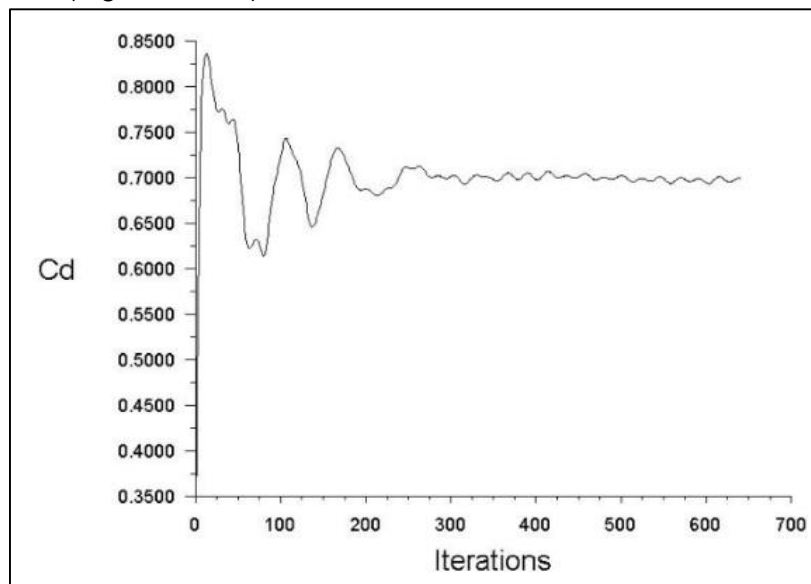


Figura: 13-19 Coeficiente de arrastre (Autores)

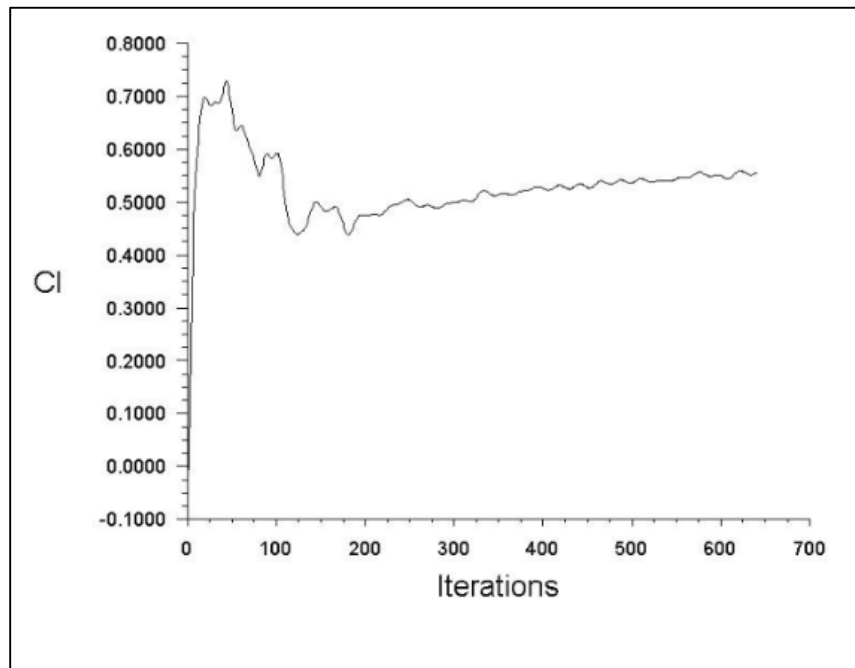


Figura: 13-20 Coeficiente de sustentación (Autores)

Los contornos de presión para esta simulación alcanzaron un valor máximo aproximado de 754.40 Pa en las mismas zonas de las simulaciones anteriores (tomas de aire, punta y parte delantera de las ruedas, Figura: 13-19; Figura: 13-20).

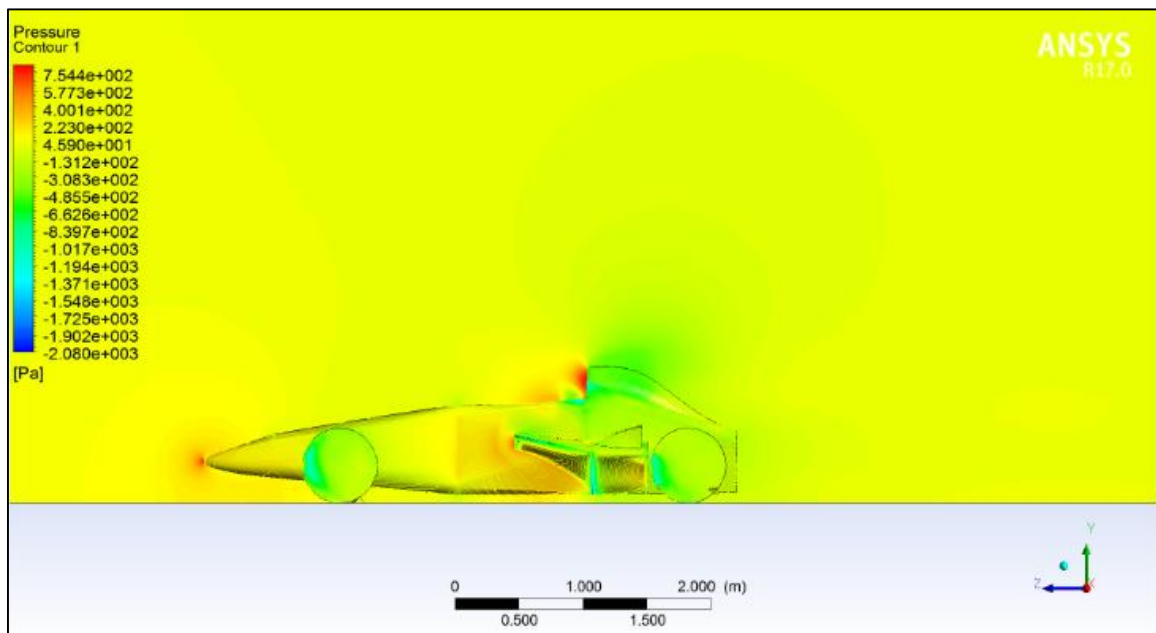


Figura: 13-21 Contorno de presión en el plano de simetría (Autores)

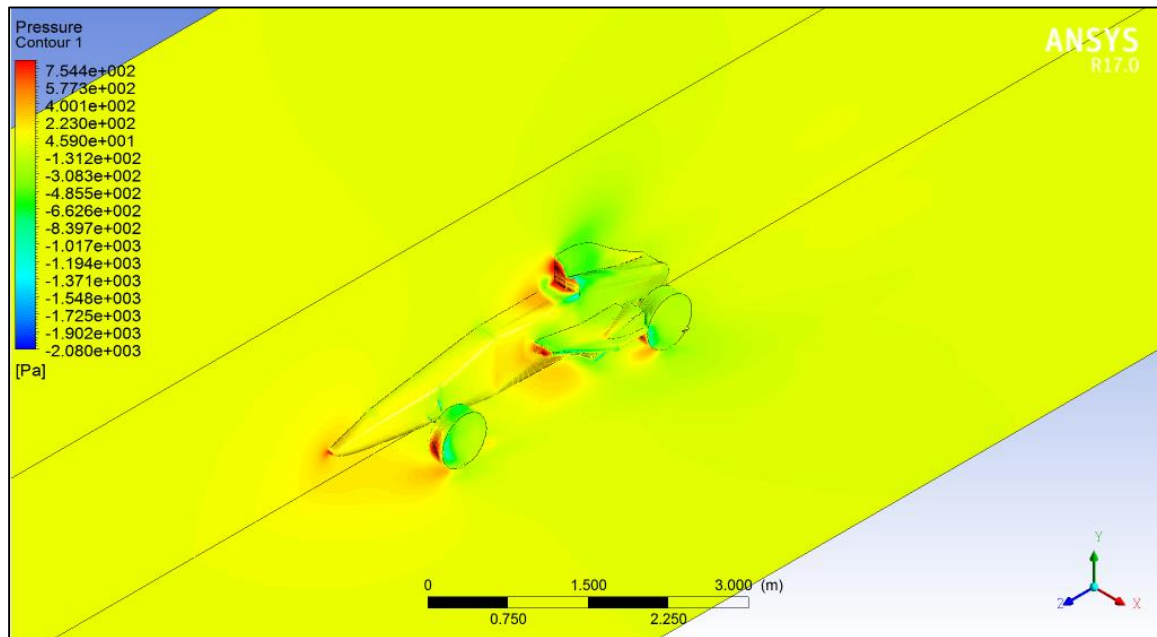


Figura: 13-22 Zonas de presión máxima. (Autores)

Se pueden observar zonas de baja presión en el borde de las llantas oscilando entre -1371 Pa debido al incremento de la velocidad en esta parte del vehículo (Figura: 13-23).

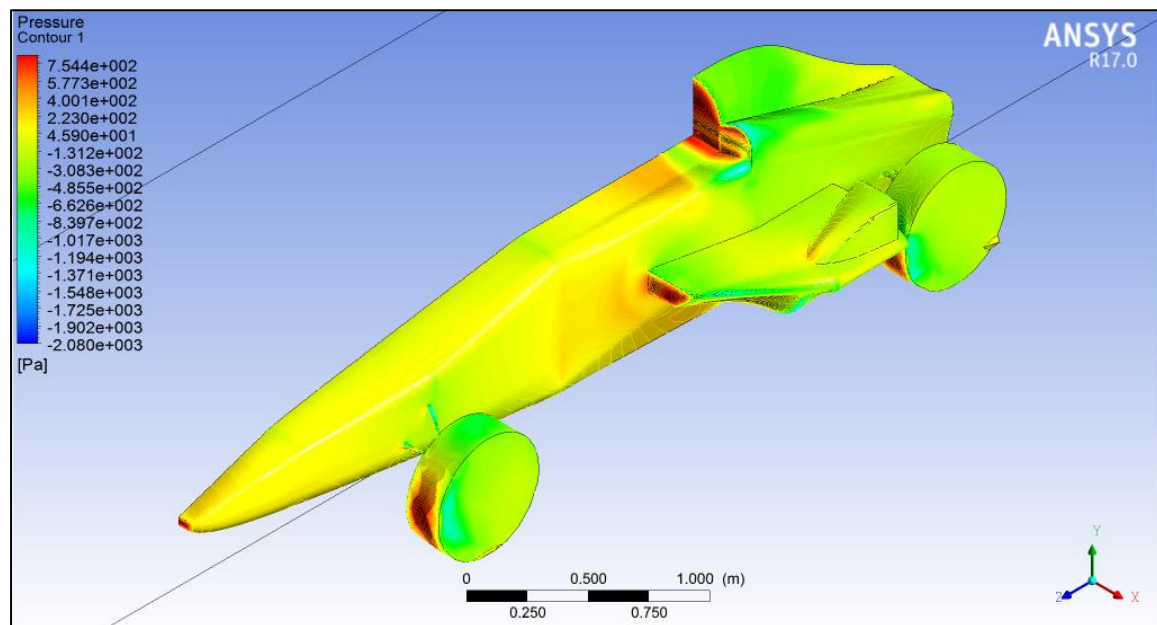


Figura: 13-24 Contornos de presión estática. (Autores)

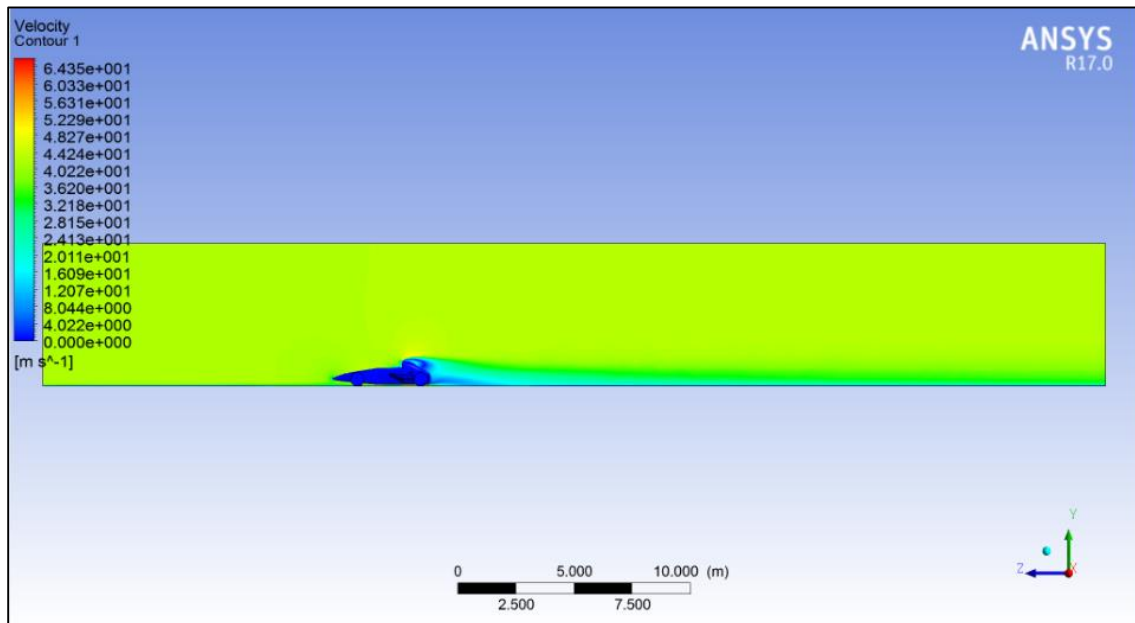


Figura: 13-25 Contornos de velocidad. (Autores)

En esta simulación la velocidad incrementa a 52.29 m/s en la parte superior del vehículo mientras que en la estela, el valor vuelve a ser de 4 m/s (Figura: 13-25).

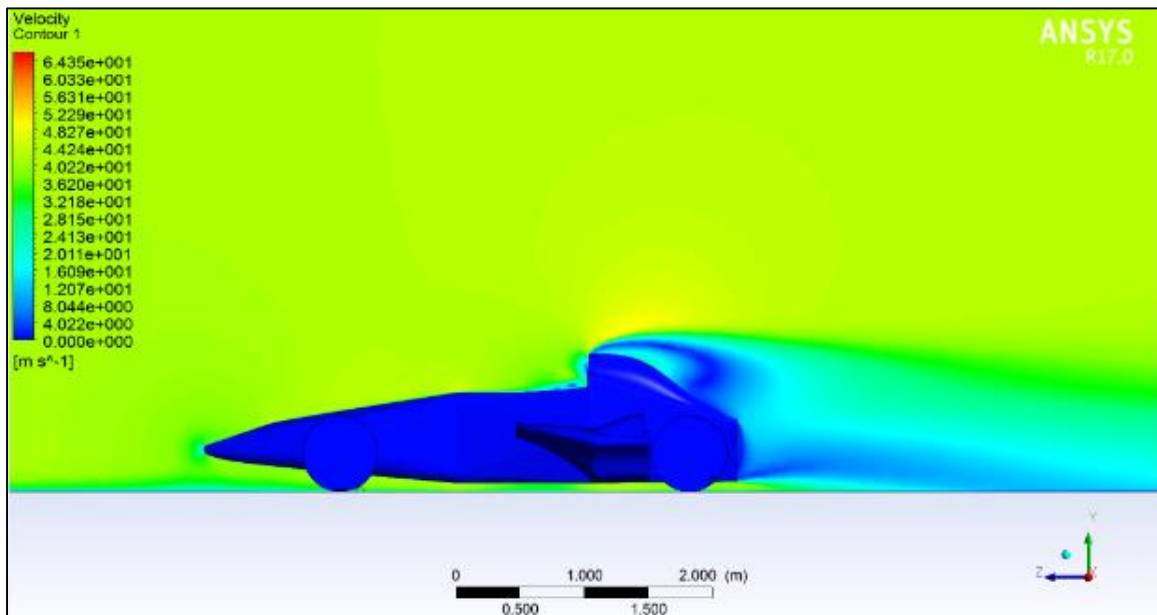


Figura: 13-26 Contornos de velocidad. (Autores)

13.1.4 Malla 4

La estabilidad para esta simulación se da a partir de la iteración 400 que es cuando los residuos descienden acercándose a $1e-05$ (Figura: 13-26).

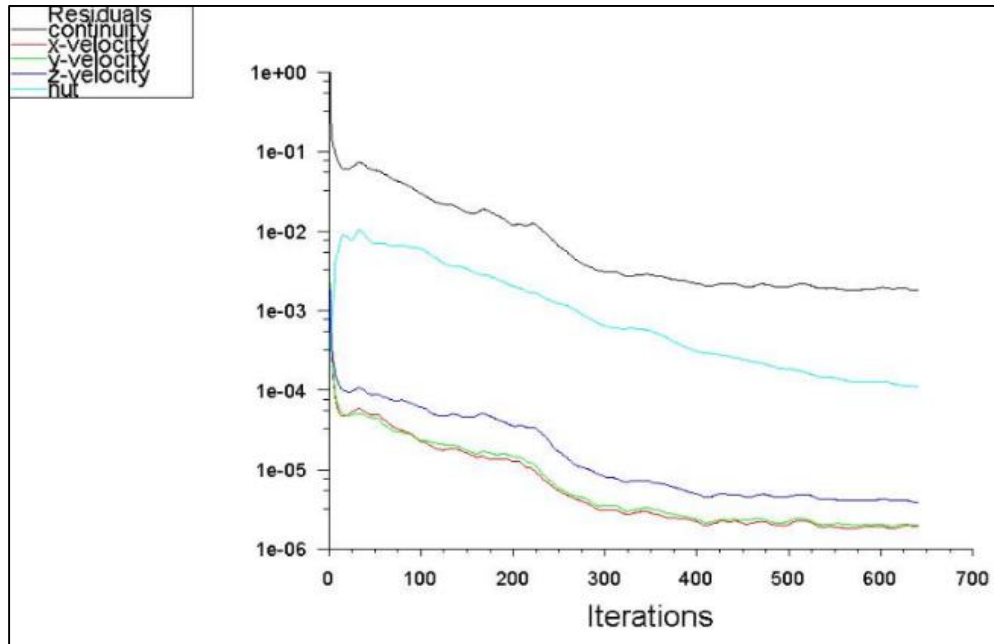


Figura: 13-26 Residuos (Autores)

La grafica para el coeficiente de arrastre oscila inicialmente entre un valor bajo de 0.37315 y un valor máximo de 0.83596 en las primeras 220 iteraciones. De allí en adelante los valores se estabilizan logrando un valor final de 0.69942 (Figura: 13-27). Para el coeficiente de sustentación la gráfica comienza con una oscilación de 0.12372 a 0.72794, logra estabilizarse a partir de la iteración 450 logrando un valor final de 0.55536 (Figura: 13-28).

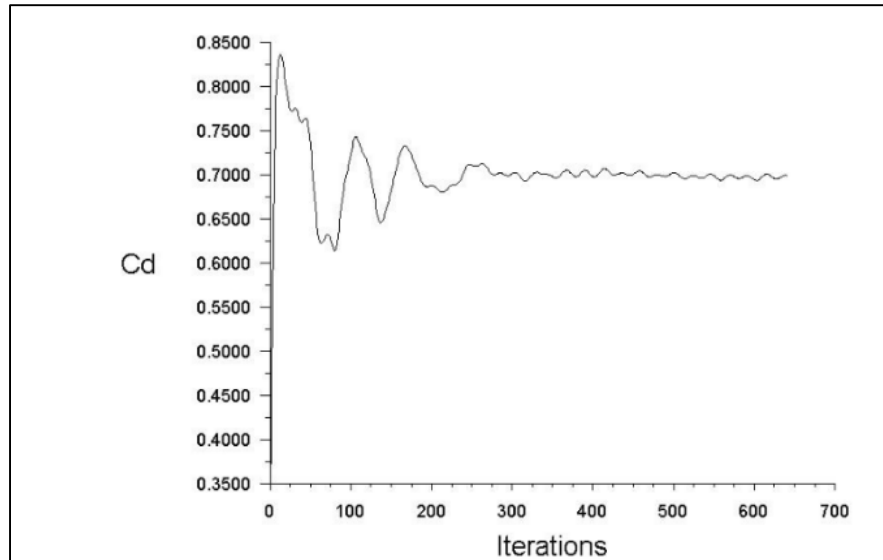


Figura: 13-27 Coeficiente de arrastre (Autores)

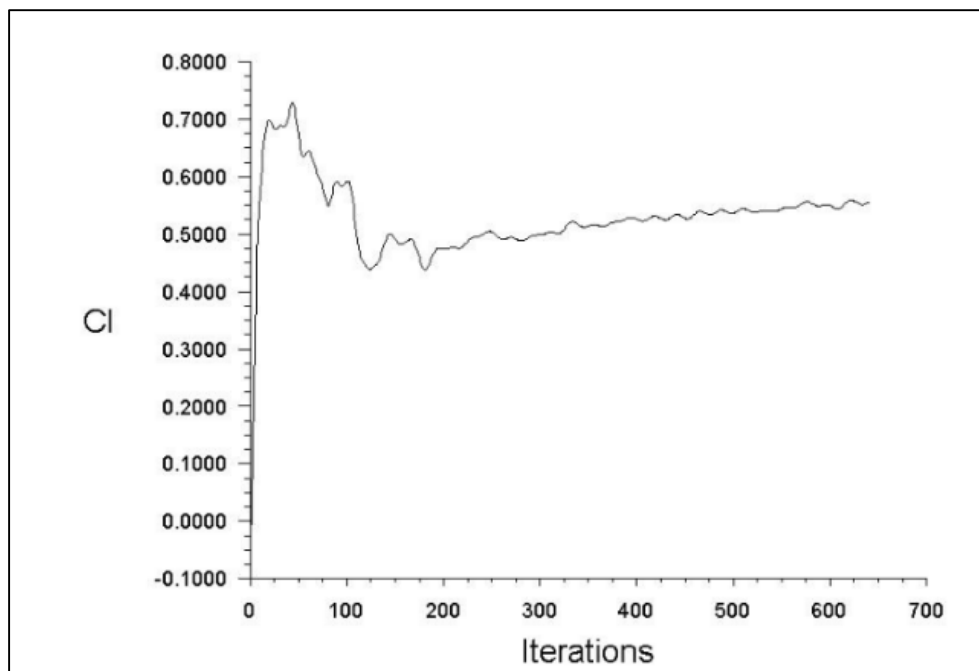


Figura: 13-28 Coeficiente de sustentación (Autores)

Como en las simulaciones anteriores, los contornos se mantienen iguales cambiando ligeramente en los valores máximos que alcanza la presión (763.90 Pa) en las mismas zonas (Figura: 13-279; Figura: 13-30)

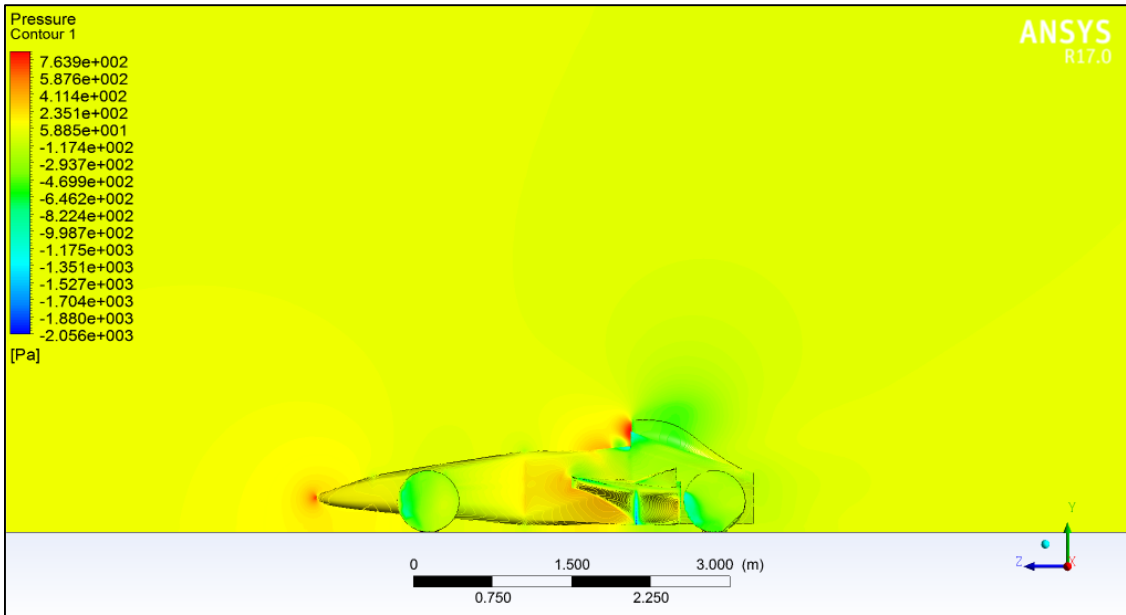


Figura: 13-28 Presión en el plano de simetría. (Autores)

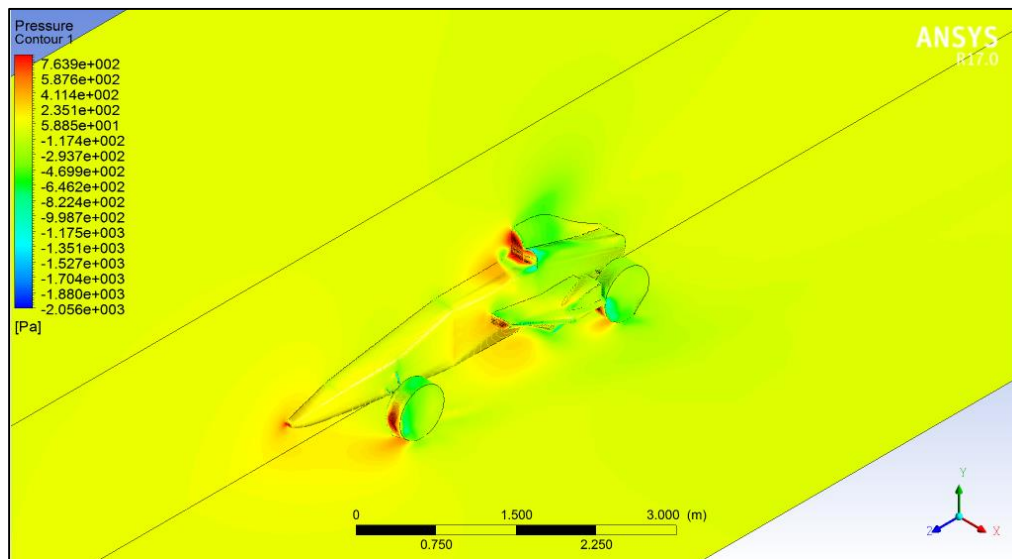


Figura: 13-29 Presión en el plano de simetría. (Autores)

Las zonas de baja presión siguen siendo las mismas con una ligera modificación en el valor (-1175 Pa) como se muestra en la Figura: 13-30.

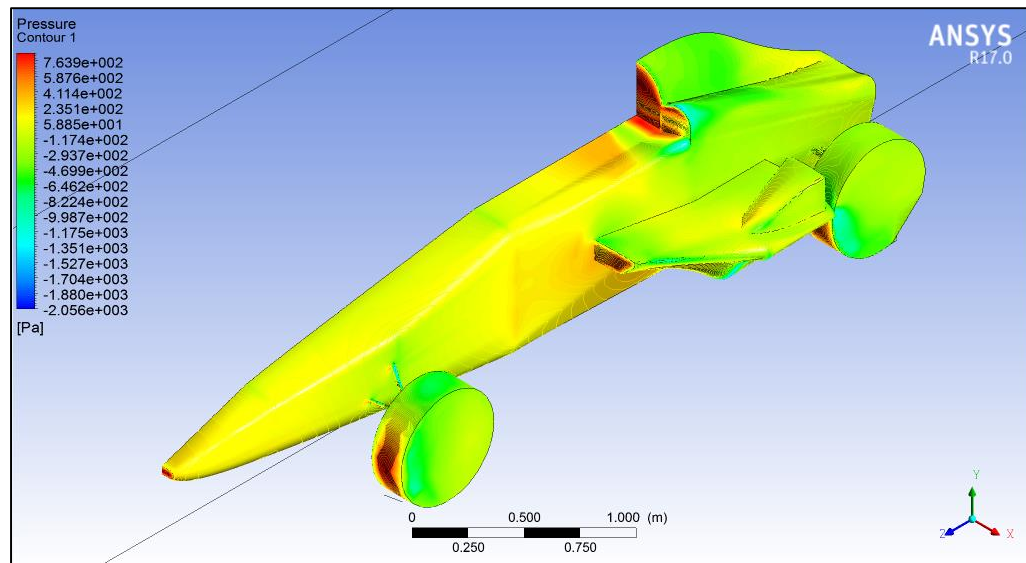


Figura: 13-31 Contornos de presión estática. (Autores)

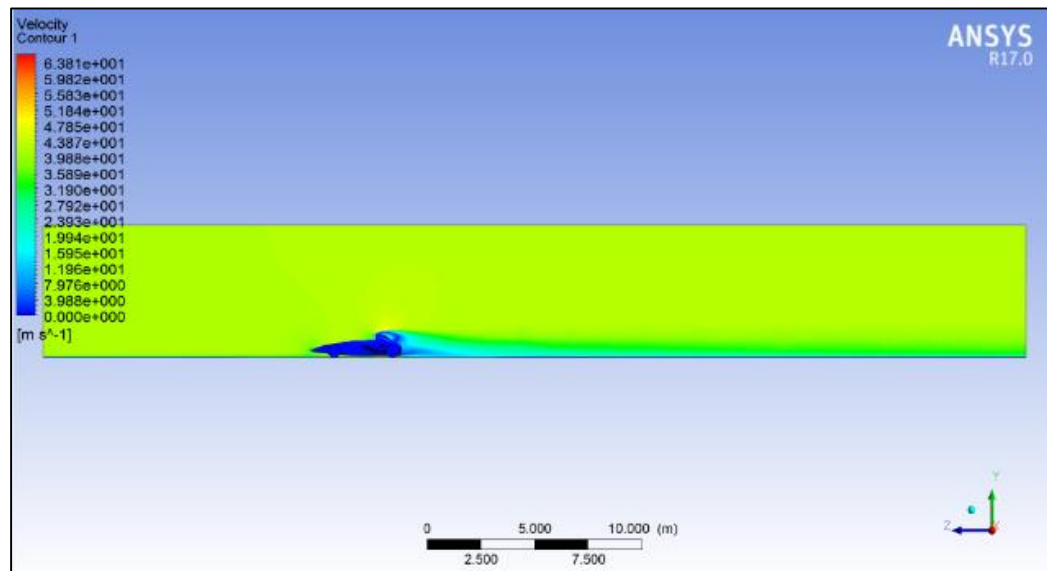


Figura: 13-32 Contornos de presión estática. (Autores)

La velocidad se mantiene en un valor de 50.80 m/s en la parte superior del vehículo mientras que en la estela llega a un valor de 3.5 m/s (Figura: 13-25).

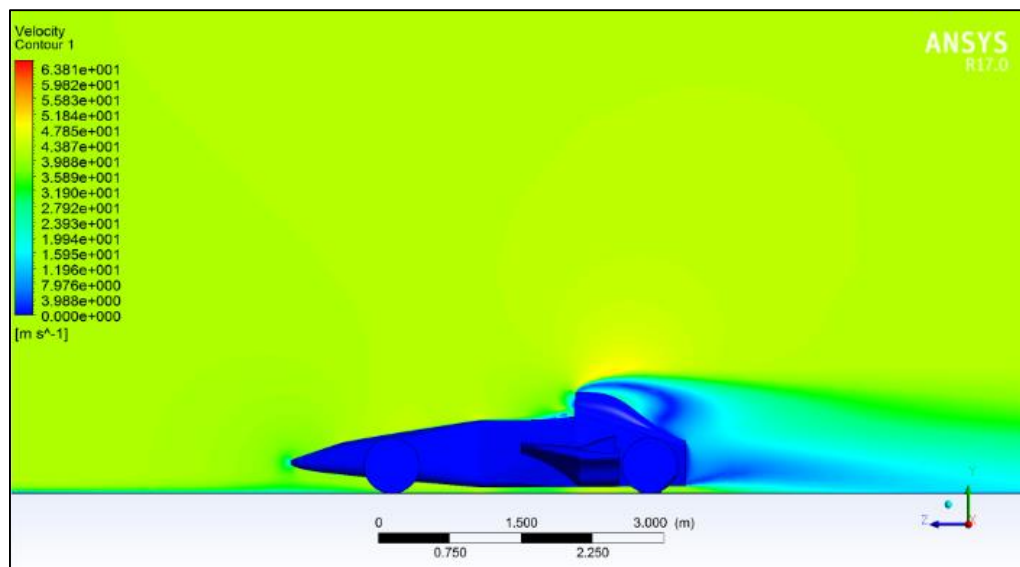


Imagen 31. Contornos de velocidad. (Autores)

13.2 Resultados para las mallas sin carenados

13.2.1 Malla 1

Se sigue la misma metodología para el modelo sin carenados. La primera simulación se estabiliza a partir de la iteración 400 como lo muestra la gráfica de los residuos (Figura 13 2) al descender a $1e-05$.

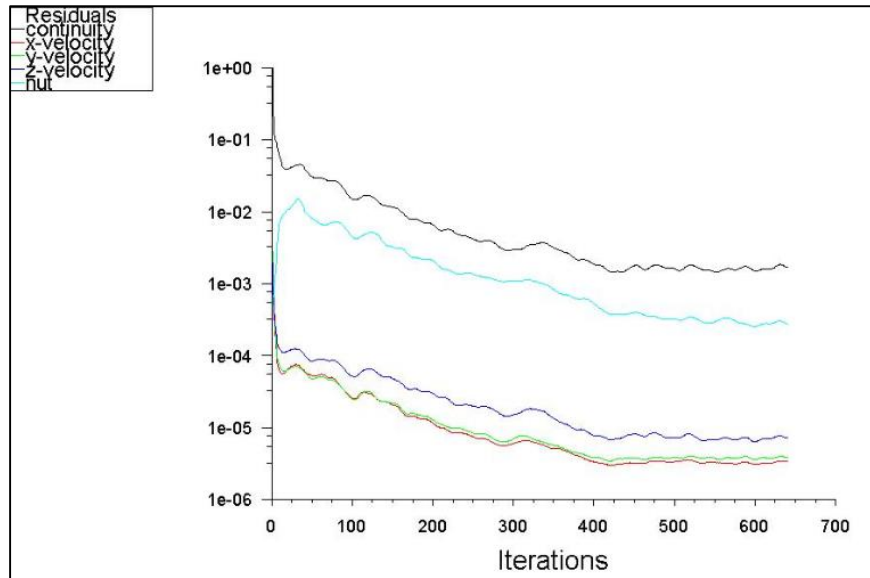


Figura: 13-33 Residuos (Autores)

Para los coeficientes, en el caso del de arrastre, la estabilidad comienza a partir de la iteración 320 con un valor de 0.738974 hasta finalizar con la iteración 640 en 0.73180. El coeficiente de sustentación comienza siendo muy bajo (0.14248) durante las primeras iteraciones pero como en el caso anterior, a partir de la misma iteración comienza a estabilizarse oscilando ligeramente y finalmente logrando el valor de 0.58302 (Figura: 13-36; Figura: 13-37).

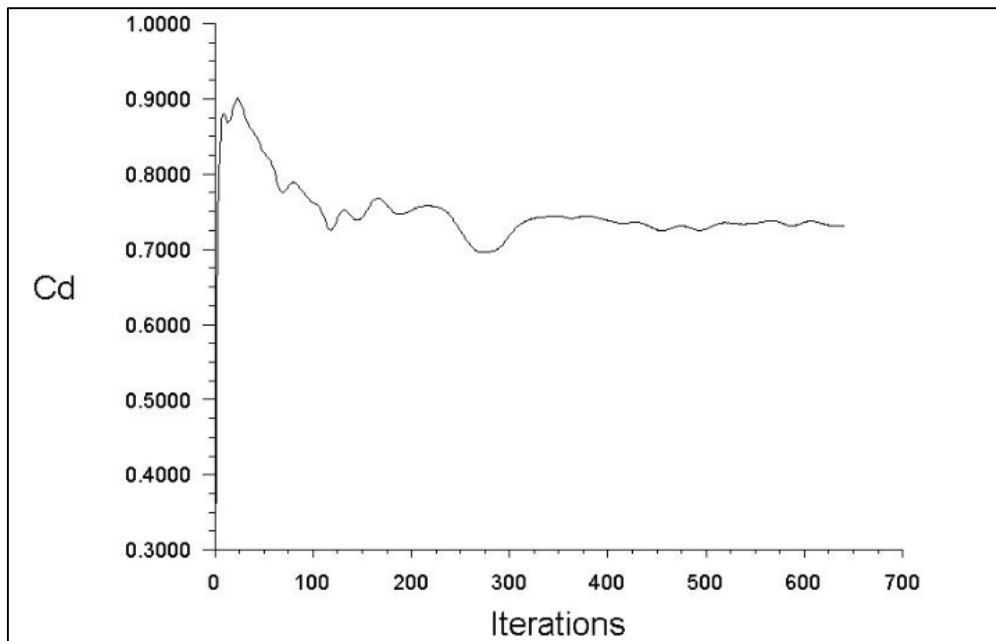


Figura: 13-36 Coeficiente de arrastre (Autores)

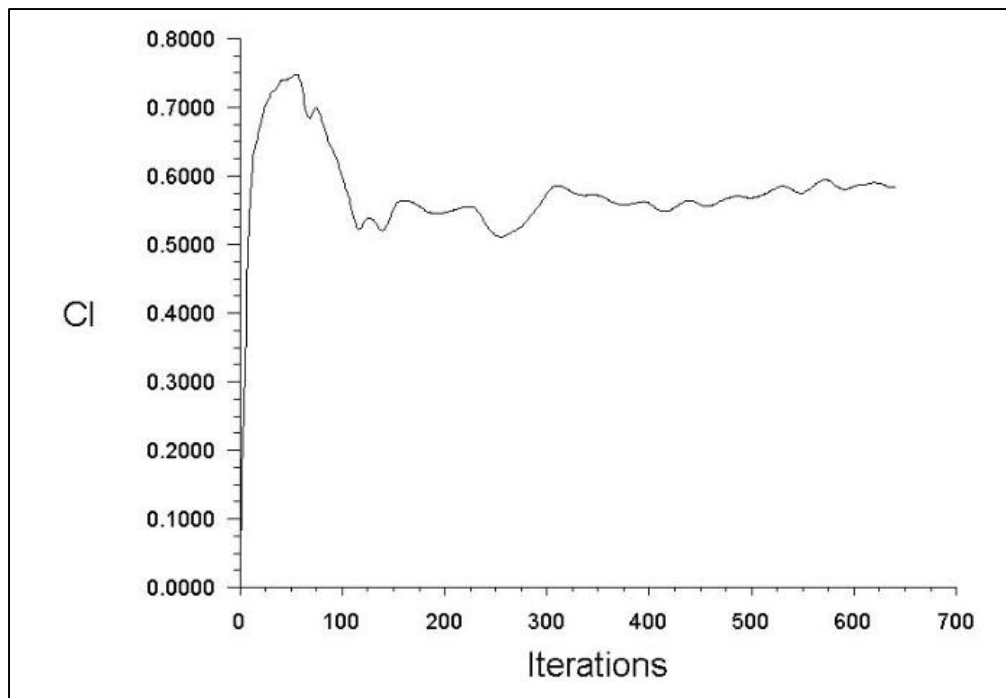


Figura: 13-34 Coeficiente de sustentación (Autores)

Los contornos de presión para el modelo sin carenados resultan similares a los del modelo anterior. Las zonas de alta presión siguen siendo las mismas pero ahora la presión aumenta en la parte superior de la rueda trasera alcanzando un valor de aproximadamente 415.60 Pa, siendo la presión máxima de 768.40 Pa. (Figura: 13-35; Figura: 13-367)

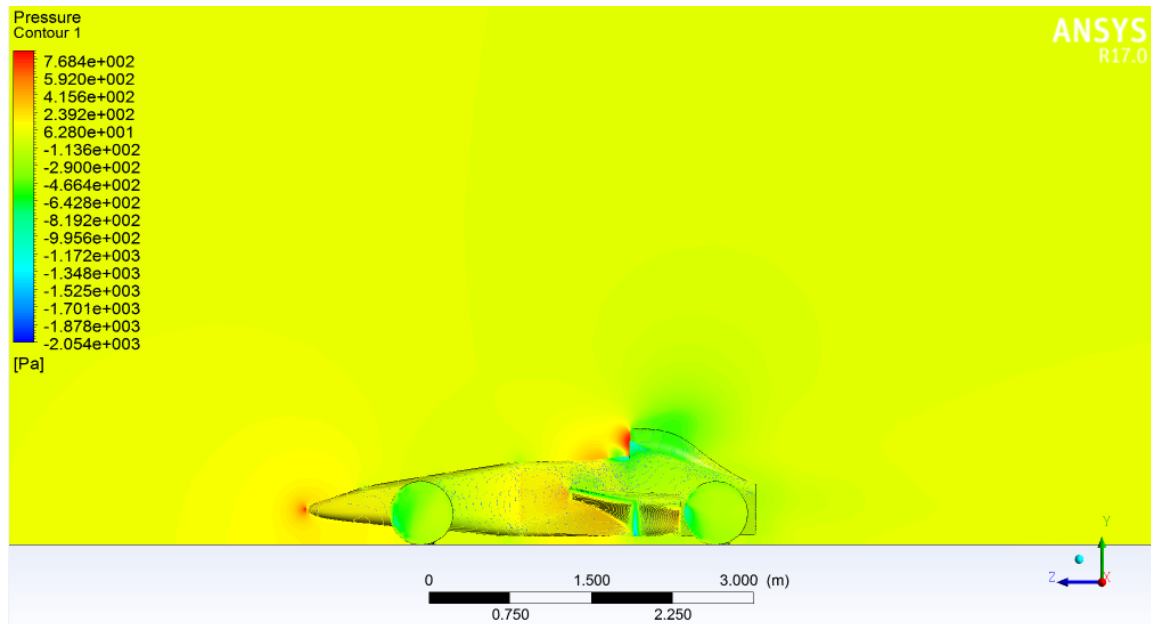


Figura: 13-37 Presión en el plano de simetría. (Autores)

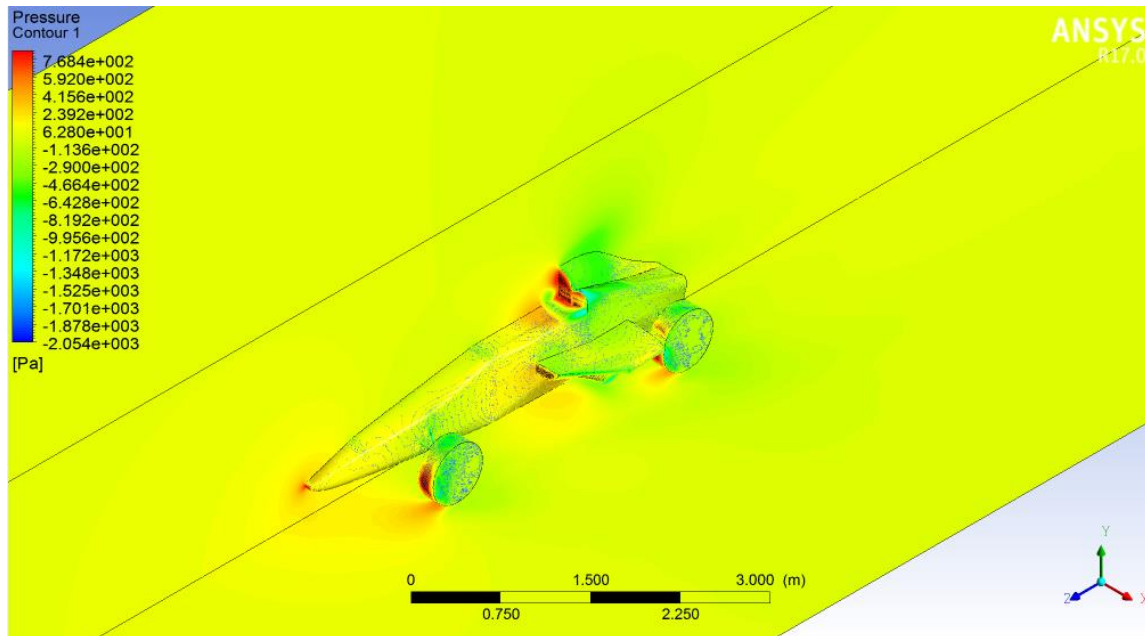


Figura: 13-38 Presión en el plano de simetría. (Autores)

Siguen generándose zonas de baja presión alrededor de la toma de aire tanto lateral como superior con un valor aproximado de -1240 Pa (Figura: 13-38).

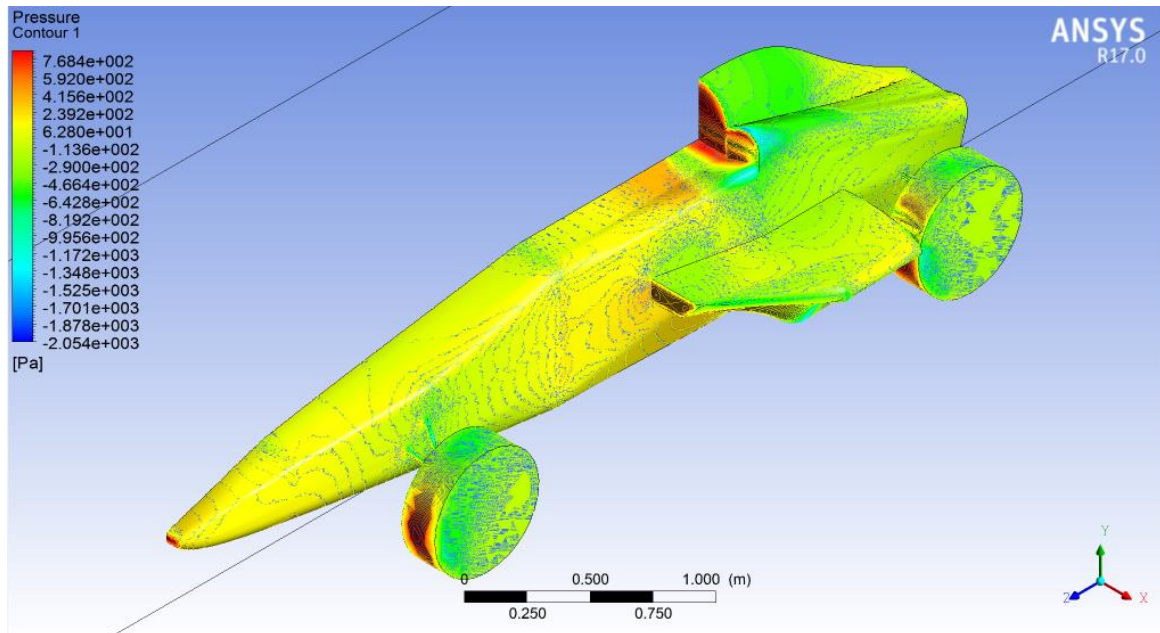


Figura: 13-39 Contornos de presión estática. (Autores)

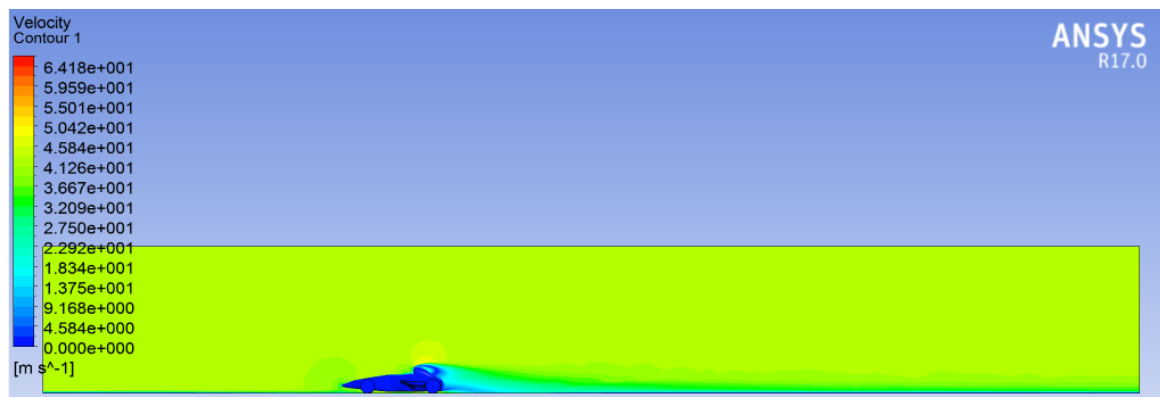


Figura: 13-39 . Contornos de velocidad. (Autores)

Similar al modelo con carenado trasero, la velocidad incrementa ligeramente a casi 50 m/s en la parte superior del monoplaza debido a la geometría de esta zona. Se genera también

una estela en la parte trasera del vehículo cuya velocidad es cercana a los 6 m/s (Figura: 13-40).

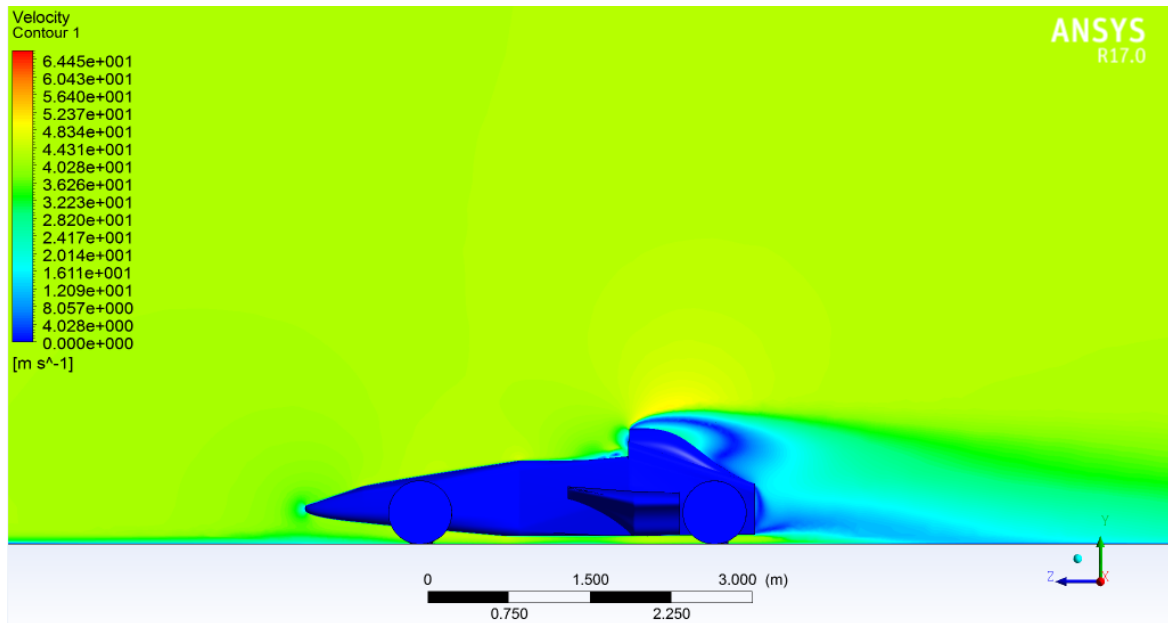


Figura: 13-41 . Contornos de velocidad. (Autores)

13.2.2 Malla 2

Los residuos llegan a $1\text{e-}05$ a partir de la iteración número 200, pero realmente se estabilizan a partir de la 500 que es cuando casi alcanzan $1\text{e-}06$ (Figura: 13-42).

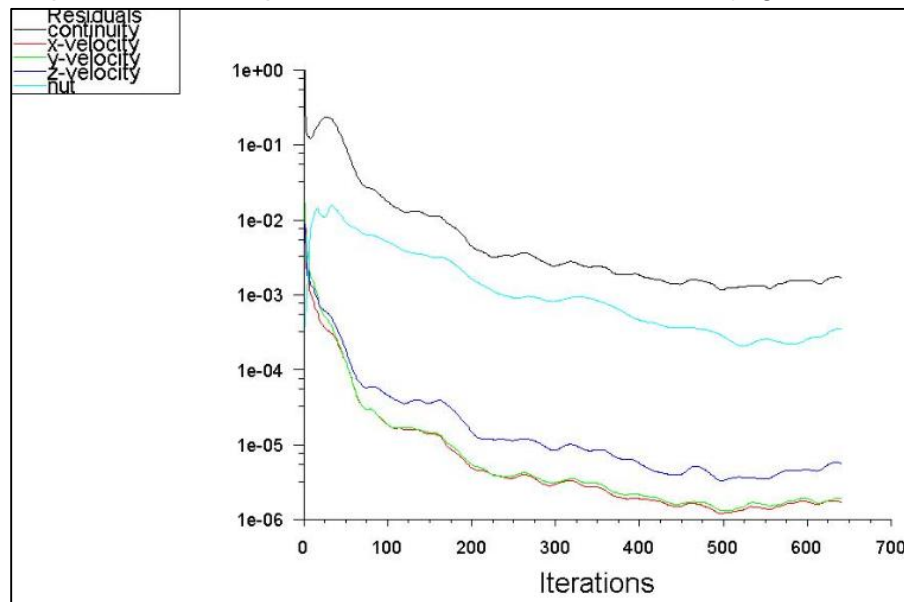


Figura: 13-431 Residuos (Autores)

El coeficiente de arrastre comienza con un valor negativo de -48.4492, desciende rápidamente y a partir de la iteración 130 se estabiliza oscilando entre 0.752629 y el valor final de 0.73688 (Figura: 13-442). De forma similar el coeficiente de sustentación inicia con un valor negativo bastante alto de -67.9150 que disminuye con el paso de las primeras iteraciones, a partir de la iteración 417 comienza a estabilizarse oscilando entre 0.599645 y el valor final de 0.59048 (Figura: 13-453).

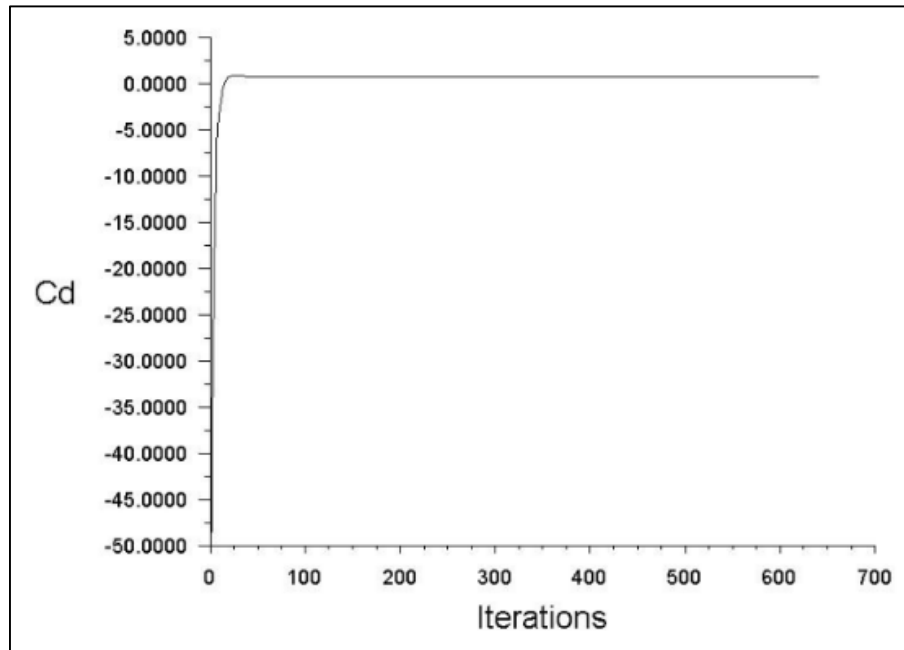


Figura: 13-462 Coeficiente de arrastre (Autores)

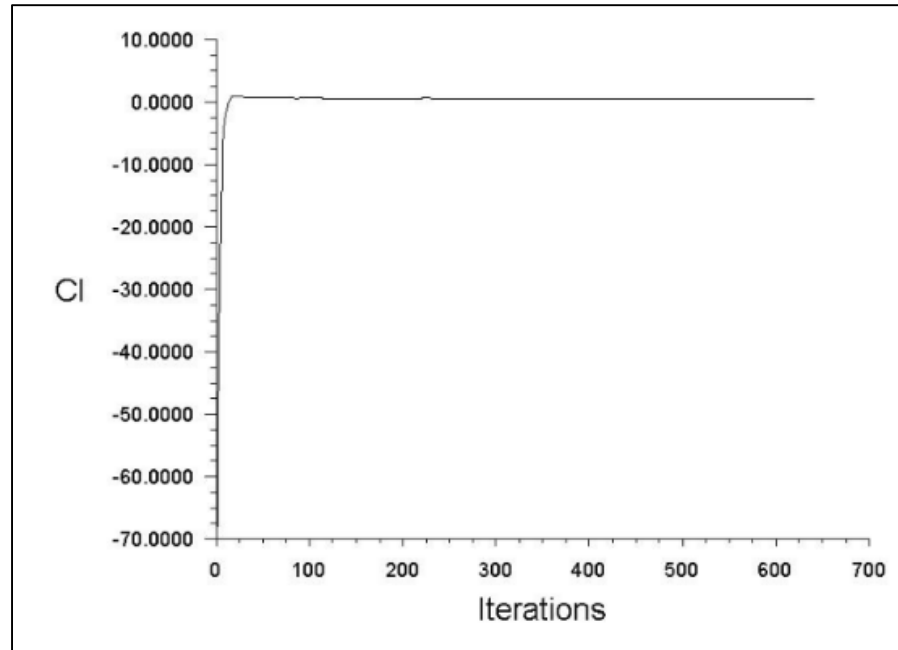


Figura: 13-473 Coeficiente de sustentación (Autores)

Las zonas de presión máxima alcanzan un valor de 743 Pa. Para esta simulación, la parte superior de la rueda trasera alcanza una presión de 546.50 Pa (Figura: 13-48, Figura: 13-49)

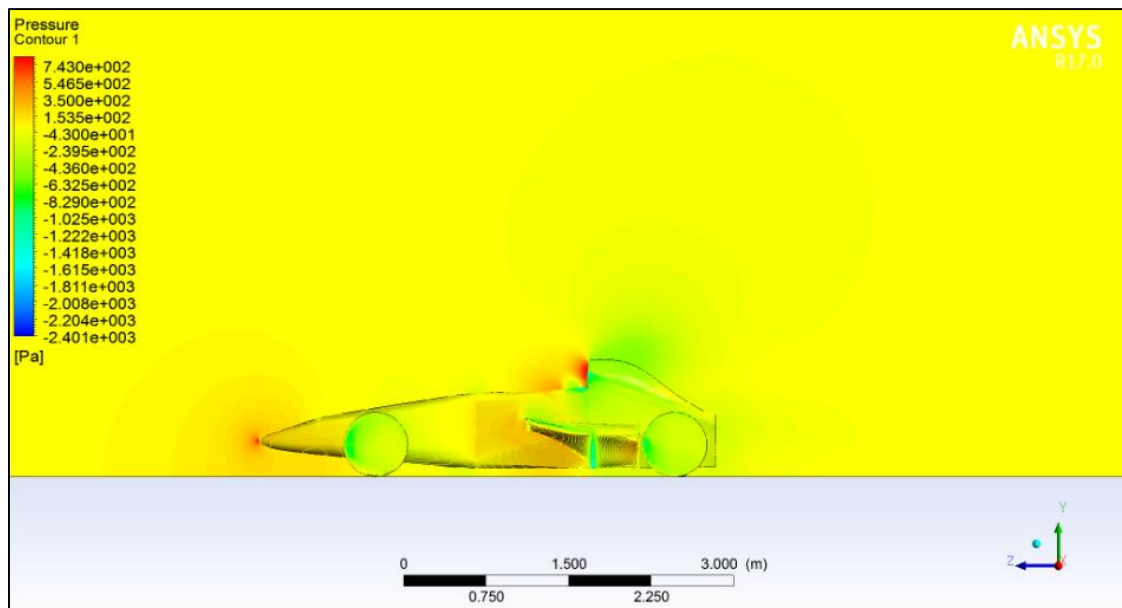


Figura: 13-50 Presión en el plano de simetría. (Autores)

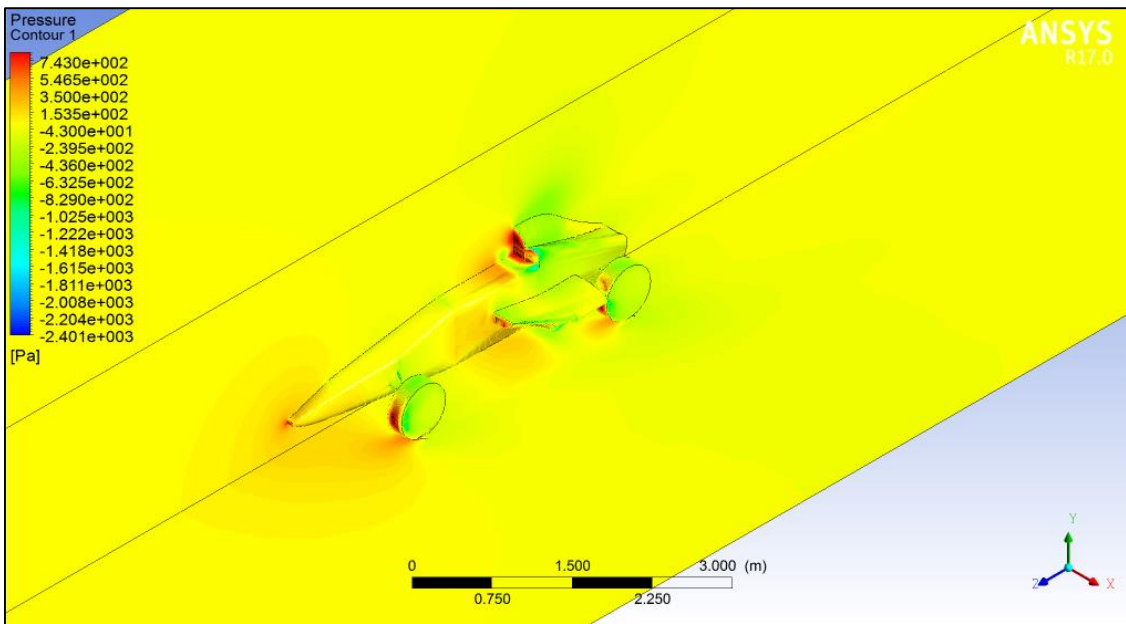


Figura: 13-51 Presión en el plano de simetría. (Autores)

Similar a todas las simulaciones anteriores, las zonas de baja presión se mantienen pero esta vez con un valor de -1615 Pa (Figura: 13-52).

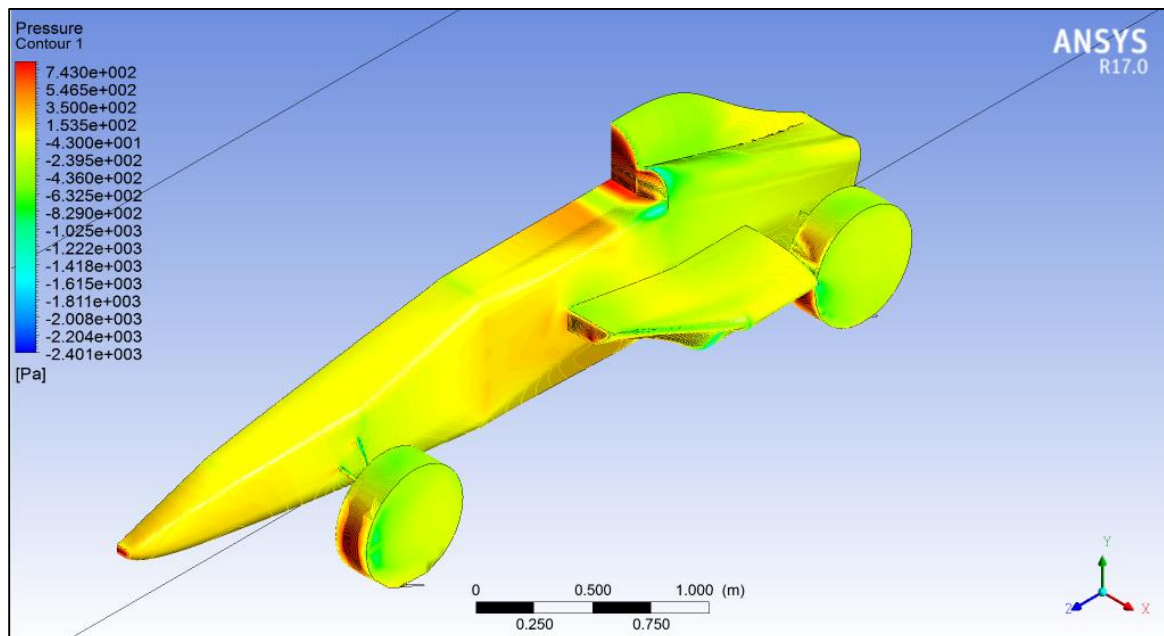


Figura: 13-53 Contornos de presión estática. (Autores)

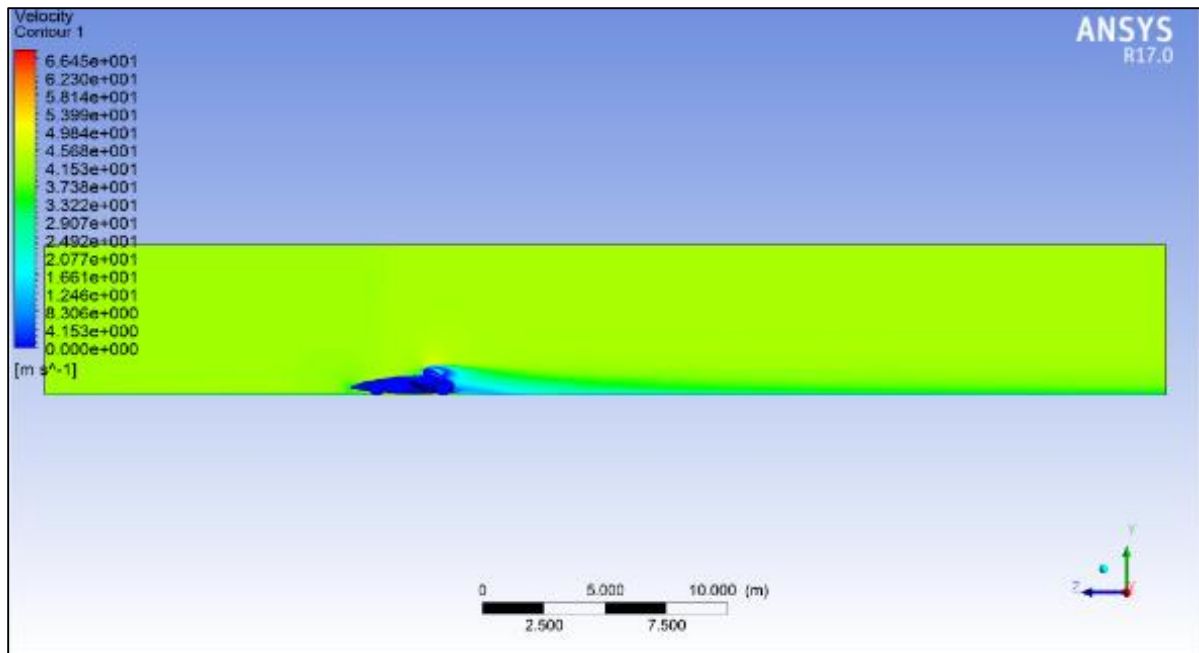


Figura: 13-54 Contornos de presión estática. (Autores)

Los contornos de velocidad cambian ligeramente en el valor alcanzando un valor máximo de 52.30 m/s en la zona de máxima velocidad y un valor mínimo de 4.15 m/s en la estela (Figura: 13-48).

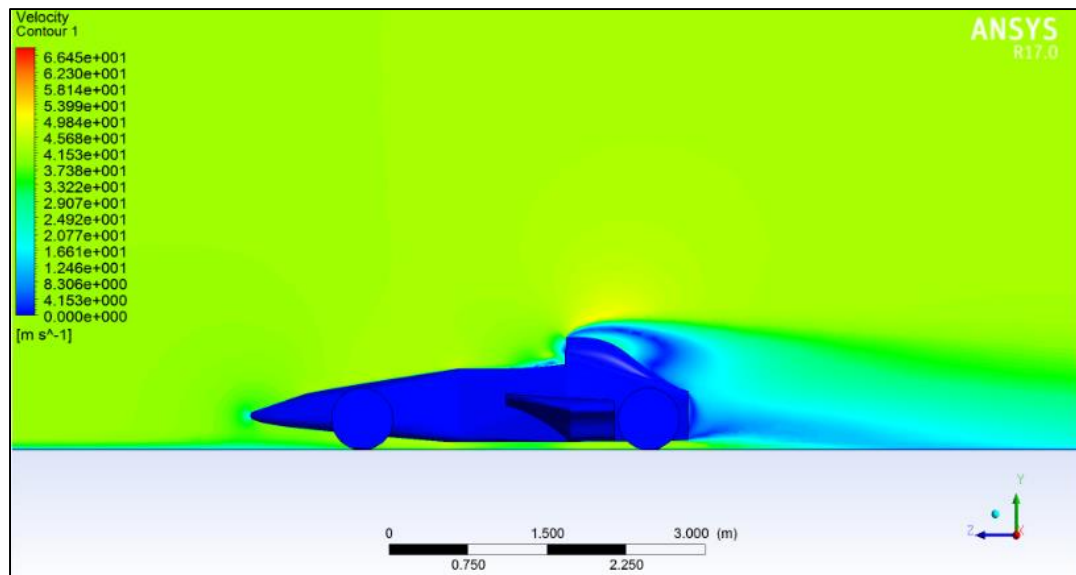


Figura: 13-55 Contornos de velocidad. (Autores)

13.2.3 Malla 3

Los residuos descienden a $1e-05$ a partir de la iteración 280 y se estabilizan a partir de la número 500. Esta simulación logra la convergencia en la iteración 636 (Figura: 13-49).

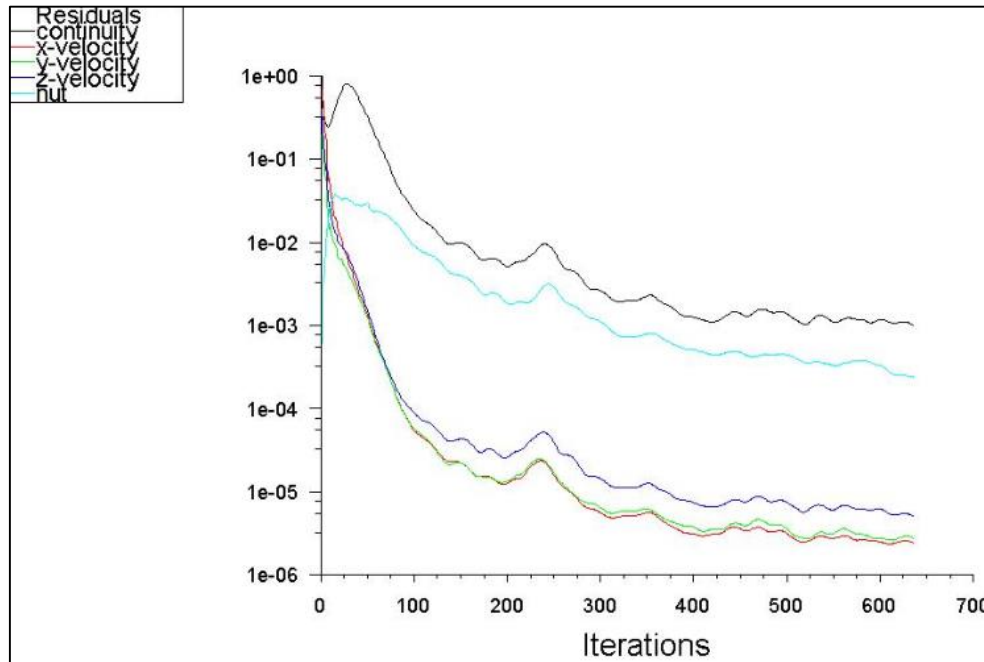


Figura: 13-49 Residuos (Autores)

Las gráficas de los coeficientes comienzan con valores demasiado altos debido a la inestabilidad del esquema coupled. Para el caso del C_D el valor inicial fue de 774.996, descendiendo durante las primeras 270 iteraciones a un valor más real de 0.741897 logrando la convergencia y arrojando el resultado exacto de 0.73149 (Figura: 13-56). En el caso del C_L , la simulación inicia con un valor negativo de -462.779 logrando disminuir durante las primeras 215 iteraciones a un valor de 0.58760 y finalmente logrando la convergencia en la iteración 636 con un valor de 0.56378 (Figura: 13-50).

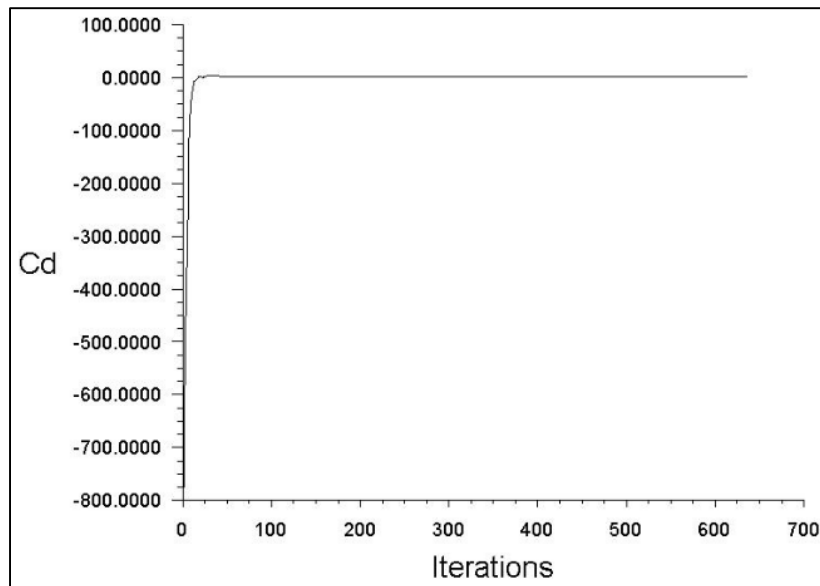


Figura: 13-57 Coeficiente de arrastre (Autores)

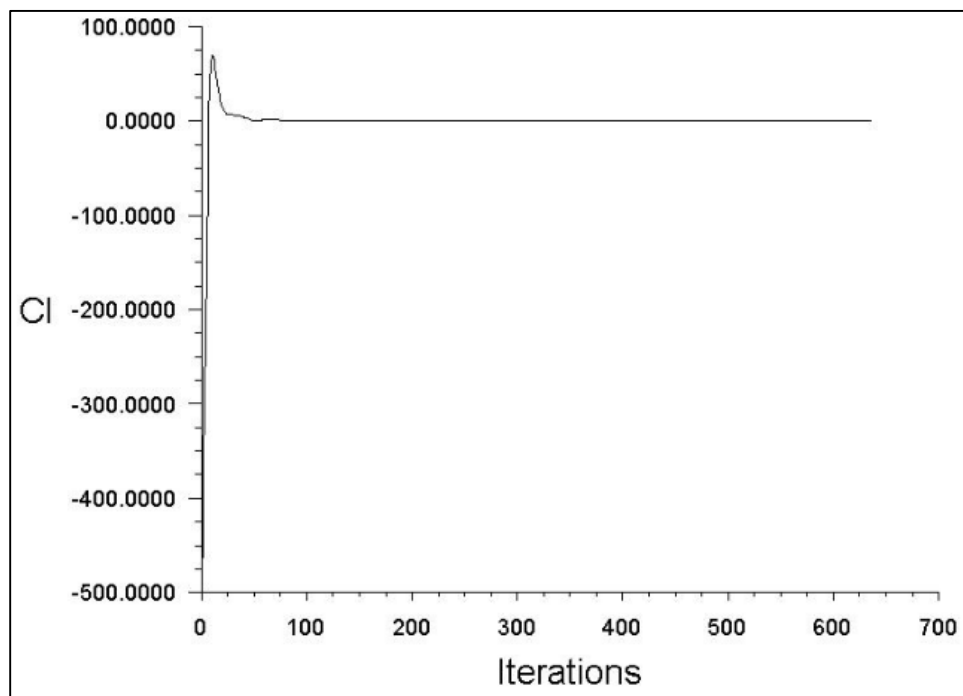


Figura: 13-58 Coeficiente de sustentación (Autores)

La presión alcanza un valor máximo de 759.20 Pa en las zonas ya conocidas. La parte superior de la rueda trasera para esta simulación alcanza un valor máximo de 550.6 Pa (Figura: 13-59; Figura: 13-60)

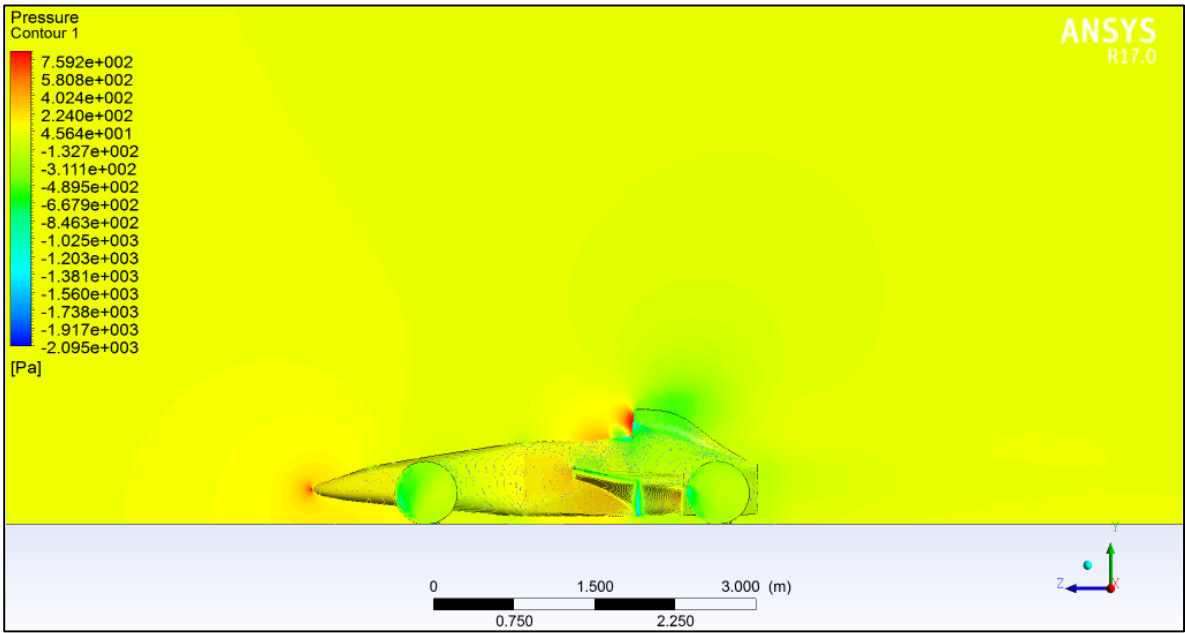


Figura: 13-61 Contorno de presión en el plano de simetría. (Autores)

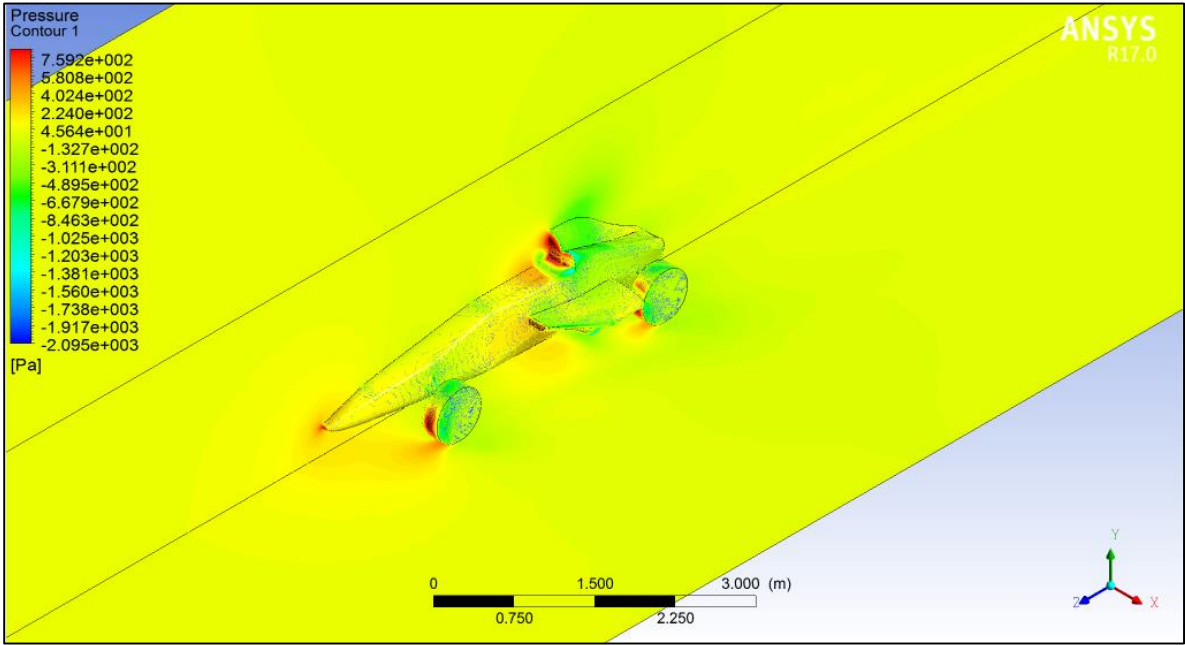


Figura: 13-62 Contorno de presión en el plano de simetría. (Autores)

En las zonas de succión o de baja presión (pontones, borde de las llantas) se alcanza un valor mínimo de -1381 Pa (Figura: 13-63).

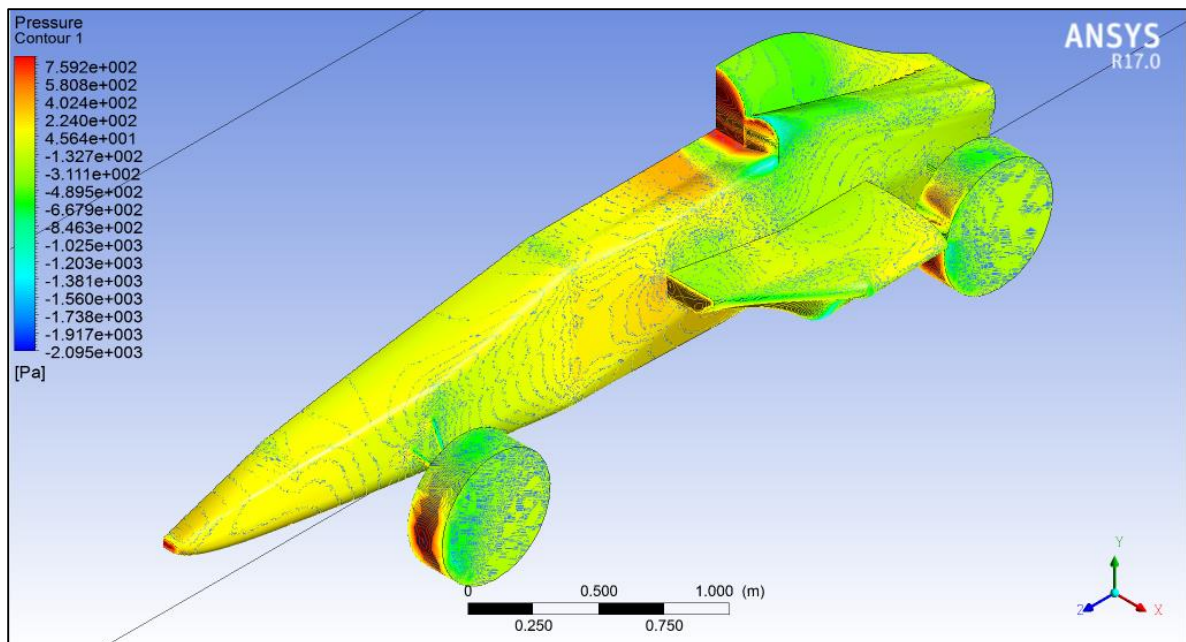


Figura: 13-64 Contornos de presión estática. (Autores)

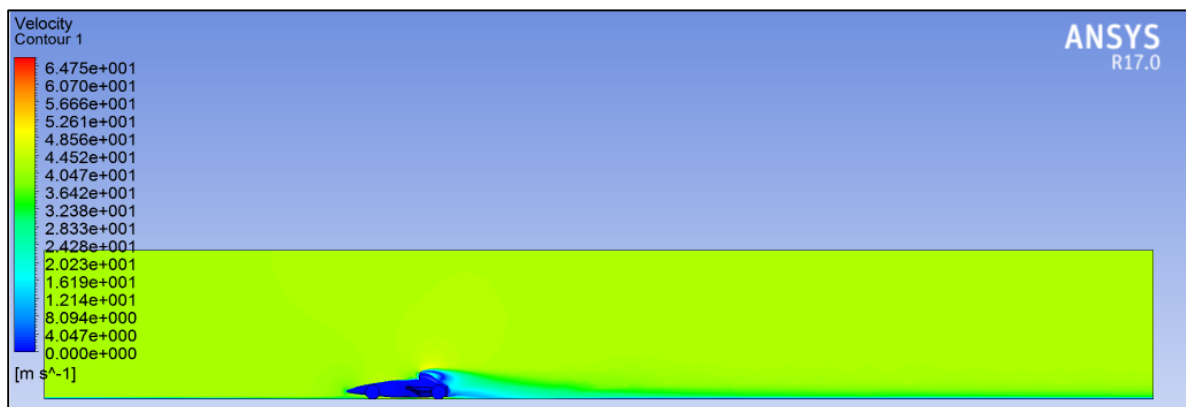


Figura: 13-65 Contornos de velocidad (Autores)

Para esta simulación la velocidad alcanza un valor máximo de 52.61 m/s en la parte superior y un valor mínimo de 4.047 m/s en la estela (Figura: 13-56).

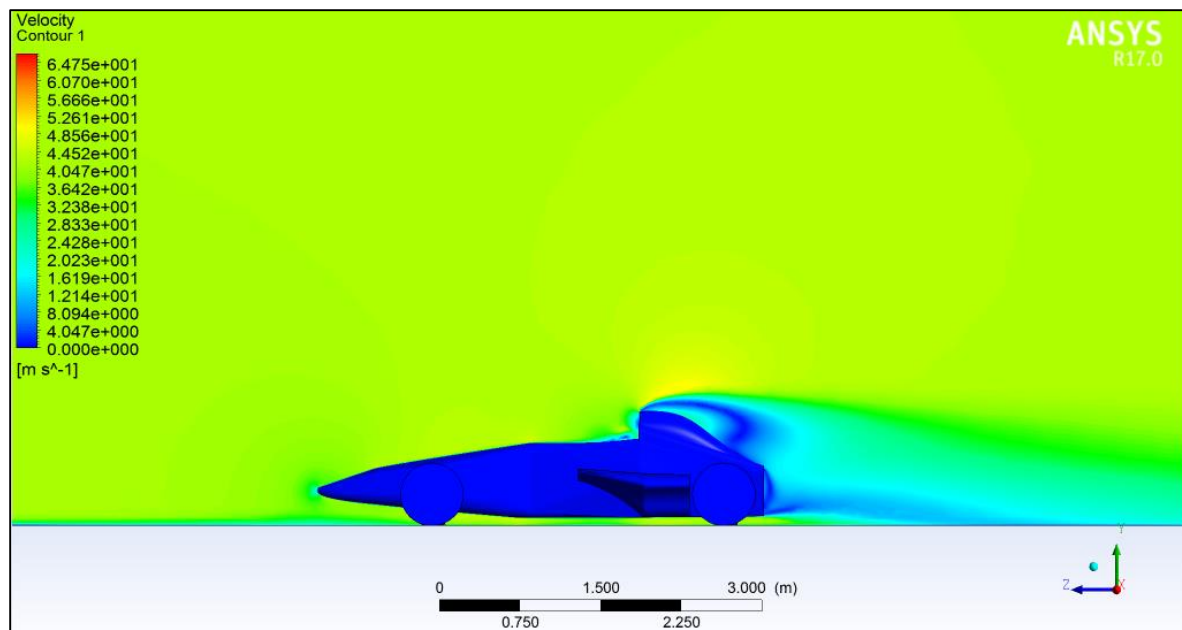


Figura: 13-66 Contornos de velocidad (Autores)

14. Análisis de los resultados

14.1 Carrocería

Como se explicó anteriormente, este proyecto consta de siete simulaciones en total, tres para el modelo sin carenado en la parte trasera y cuatro con esa superficie aerodinámica en la carrocería. Se busca establecer qué tipo de carrocería resulta óptima para la competencia.

Comenzando con los modelos con carenado, la malla 1 se realizó utilizando una capa de prismas sobre el monoplaça sin adicionarlos en el suelo para facilitar la etapa de enmallado y así analizar el comportamiento del fluido y la convergencia en el solver bajo 450 iteraciones. Como lo demuestran las gráficas de los coeficientes y los residuos la convergencia no se alcanzó, resultaban oscilaciones tanto en el arrastre como en la sustentación que no permitieron mostrar un resultado real. Además, en los contornos de velocidad se observa claramente una perturbación desde la entrada del dominio que solo se estabiliza poco antes de alcanzar el monoplaça. Este cambio en el valor inicial afectó de forma sustancial el comportamiento del fluido y con esto la simulación, requiriendo mucho tiempo adicional. Dichos fenómenos se mejoraron a partir de la malla 2 con la incorporación de prismas en el suelo del dominio logrando la convergencia y estabilización tanto en los residuos como en los coeficientes bajo el parámetro de $1 * 10^{-5}$ con 220 iteraciones demostrando la efectividad de estos elementos para captar cambios en los gradientes de velocidad cercanos a las paredes. En los contornos se puede observar como en la entrada de aire la velocidad se estabiliza y toma el mismo valor que en las condiciones iniciales tardando mucho menos tiempo que el empleado en la primera simulación. Sabiendo que los prismas son elementos fundamentales para lograr la convergencia en la malla 3 y 4 son también utilizados logrando resultados similares bajo los mismos parámetros con un refinamiento extra en la malla 3.

El arrastre generado para cada malla está dado por:

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 A c_d$$

Ecuación 29 Arrastre

Donde la densidad y la velocidad hacen parte de las condiciones iniciales de la simulación. Se tomará el área frontal del vehículo para los cálculos y el coeficiente de drag obtenido para cada malla.

Las gráficas de contornos de presión estática muestran un patrón similar para todas las simulaciones cambiando levemente en el valor, pero mostrando los mismos puntos críticos como lo son las ruedas delanteras, las tomas de aire y la punta del monoplaza cuyo valor de la presión es de 757,52 Pa. Se aprecian también zonas de succión o presiones negativas en el borde de las llantas, en los pontones y en la toma de aire de la parte superior alcanzando un valor máximo de -1478,97 Pa. Lo cual beneficia al vehículo, ya que el fluido ingresa por las tomas de aire hacia el interior refrigerando el motor y las baterías.

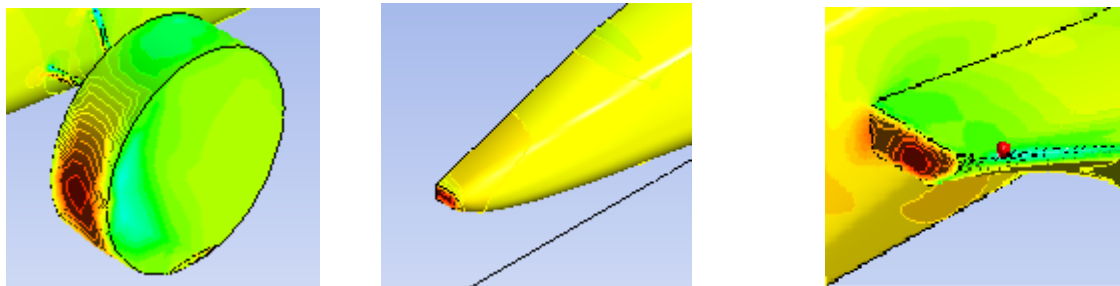


Figura: 14-1 Zonas de alta presión.

En cuanto a los contornos de velocidad también se muestra un comportamiento similar en todas las simulaciones, en la parte delantera se presenta un punto de estancamiento donde la velocidad disminuye a 0 y progresivamente va aumentando hasta llegar al valor de la corriente libre. Se observa un desprendimiento cerca a la toma de aire superior con un aumento considerable de la velocidad (51.465 m/s) para luego disminuir en la parte trasera con valores muy bajos (4.125 m/s) provocando una estela turbulenta. También se observa una pequeña turbulencia en la zona del piloto, la velocidad disminuye ($4,8966 \text{ m/s}$) provocando una recirculación del fluido. En la parte trasera del monoplaza se observa

mediante las líneas de trayectoria el gran desorden que posee el fluido en la estela turbulenta formando remolinos con valores bajos de velocidad (3.3458 m/s). Otra zona crítica con gran desorden en el fluido son las llantas, cuyas líneas de trayectoria muestran torbellinos que se expanden vertical y horizontalmente con cambios bruscos en la velocidad.

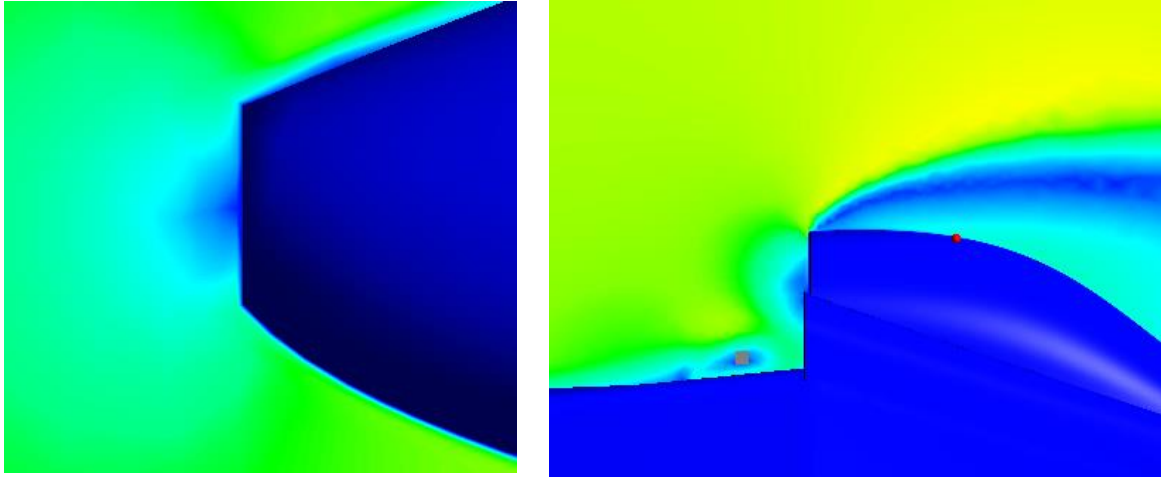


Figura: 14-2 Punto de estancamiento en la parte delantera del monoplaça (izquierda) y zona de desprendimiento en la partes superior (derecha).

La siguiente fase fue la simulación del modelo sin carenado con los mismos parámetros de malla y solver empleados anteriormente.

Las gráficas para los contornos de presión son similares, aunque se puede observar una zona de alta presión de 504.23 Pa en la parte superior de la rueda trasera del monoplaça que en las simulaciones con carenados no existía. Las zonas de presiones negativas en las llantas poseen valores menores de -1412 Pa, generando fenómeno de succión menos pronunciado que en el caso expuesto con los carenados. La presión crítica en ambas simulaciones se da en las mismas zonas, pero cambiando ligeramente en el valor, en el modelo sin carenados la presión máxima alcanza un valor de 756.86 Pa, mientras que en el modelo con dichas superficies es de 758 Pa.

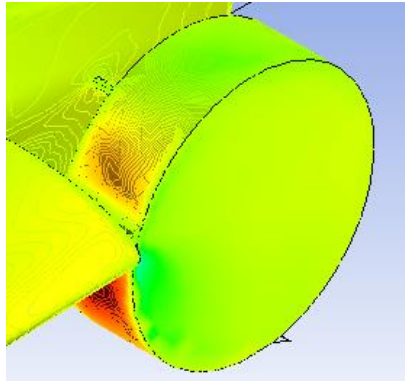


Figura: 14-3 Distribución de presiones en la rueda trasera del vehículo.

En cuanto a los contornos de velocidad el modelo sin carenados posee también en la parte delantera del monoplaza un punto de estancamiento donde la velocidad llega a 0 m/s . Se observa también el mismo desprendimiento en la parte superior pero esta vez con un valor de 51.633 m/s y una disminución en la parte trasera llegando a un valor mínimo de 4.7323 m/s generando nuevamente una estela turbulenta. Como en el monoplaza con carenados, la zona del piloto también muestra una baja velocidad de 5.08099 m/s generando recirculación del fluido. Se destaca que la estela turbulenta para el modelo sin carenados es menor que para el modelo con carenados con un valor de velocidad mayor en la estela generando menos arrastre al avance.

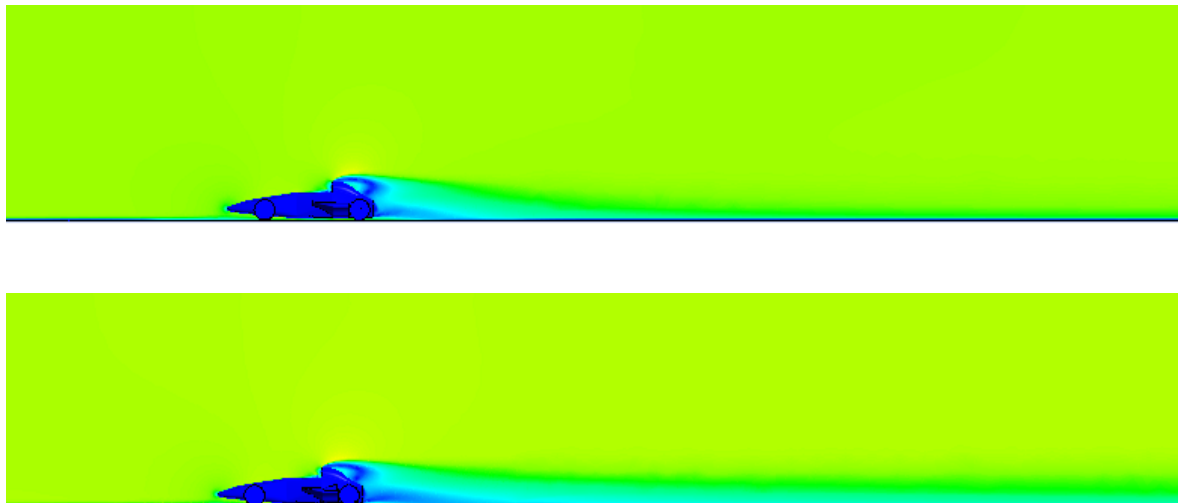


Figura: 14-4 Estela de velocidad para el modelo sin carenados (superior) y con carenados (inferior).

14.2 Calculo de velocidad

Teniendo el dato del coeficiente de arrastre C_d para el vehículo con carenado y sin carenado podemos calcular la velocidad de cada uno de ellos. Con la siguiente formula

$$Potencia = F * v$$

Ecuación 30 Potencia

$$P = \left(\frac{1}{2} (\rho) v^2 s c_d \right) * v + (m g C_{rr}) * v$$

Velocidad sin la pérdida por rodadura:

$$\sqrt[3]{\frac{p}{\frac{1}{2} \rho s c_d}} = v_p$$

$$P_{rodadura} = (m g C_{rr}) * v_p$$

Velocidad:

$$\sqrt[3]{\frac{P - P_{rodadura}}{\frac{1}{2} \rho s c_d}} = v$$

Los datos a continuación muestran la máxima velocidad que puede obtener el monoplaza con las diferentes configuraciones.

MASA DEL CARRO CON CARROCERIA EN FIBRA DE VIDRIO	
Nombre	Masa(Kg)
Carrocería fibra de vidrio $e=3\text{mm}$ ⁵³	92,5
Componentes	137,0
Piloto	75,0
Chasis ⁵⁴	185
llantas x 4	72,0
Total	562

Tabla 16 Masa del carro con carrocería en fibra de vidrio

MASA DEL CARRO CON CARROCERIA EN FIBRA DE CARBONO	
Nombre	Masa(Kg)
Carrocería fibra de Carbono $e=3\text{mm}$	64,0
Componentes	137,0
Piloto	75,0
Chasis	185
llantas x 4	72,0
Total	533

Tabla 17 Masa del carro con carrocería en fibra de carbono

⁵³ Dato obtenido con SolidWorks⁵⁴ Dato obtenido con ANSYS

	Área Frontal (m ²) ⁵⁵	Cd	Potencia (watts)	Peso (kg)	Densidad aire Bogotá(Kg/m ³)	Coefficiente de Rodadura asfalto
Con carenado fibra de vidrio⁵⁶	1,07	0,69	42000	567	0,947	0,035
Sin carenado fibra de vidrio	1,042	0,73	42000	562	0,947	0,035
Con carenado⁵⁷ fibra de carbono	1,07	0,69	42000	536	0,947	0,035
Sin carenado fibra de carbono	1,042	0,73	42000	533	0,947	0,035

Tabla 18 Datos iniciales

Con los resultados del Cd obtenidos en la simulación se procede a calcular la velocidad de punta del monoplaça con sus distintas configuraciones, para ello se utiliza la ecuación 30 y las masas finales de las tablas 18 y 19.

⁵⁵ Dato obtenido con ANSYS

⁵⁶ Aproximadamente los carenados tienen una masa de 5 Kg, dato obtenido con solidworks

⁵⁷ Aproximadamente los carenados tienen una masa de 3 Kg, dato obtenido con solidworks

	Velocidad sin la perdida por rodadura (m/s)	Potencia perdida debido al coeficiente de rodadura (watts)	Velocidad (m/s)	Velocidad (Km/h)	Metros ganados en 15 min
Con carenado fibra de vidrio	49,34	9598	24,41	87,88	0
Sin carenado fibra de vidrio	48,86	9419	25,12	90,43	638
Con carenado fibra de carbono	49,34	9081	25,21	90,76	0
Sin carenado fibra de carbono	48,86	8941	25,80	92,89	531

Tabla 19 Resultados de la velocidad

15. Conclusiones

15.1 Chasis

- El porcentaje de error entre las simulaciones es menor a 3%, y cumple las condiciones de energía de contacto.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, el choque que más compromete la seguridad del piloto es el lateral con poste, ya que la deformación del material se produce dentro de la cabina del piloto.
- Se podría considerar usar un absorbedor de impactos laterales o aumentar el espesor de la tubería en la parte lateral, para que proteja más el habitáculo del piloto con el fin de que la energía cinética se distribuya mejor, sin embargo, es necesario tener en cuenta la masa final para estos tipos de vehículos.
- Teniendo en cuenta la normativa Euro NCAP y los materiales sugeridos en este documento este diseño aporta la seguridad mínima necesaria al piloto en caso de accidente.

15.2 Carrocería

- Para asegurarse una pronta convergencia tanto en los residuos como en los coeficientes, se recomienda el uso de prismas en el piso del dominio para captar los gradientes de velocidad en la parte posterior al vehículo, sin estos elementos se presentan oscilaciones que no definen los valores reales para la simulación.
- La calidad y refinamiento de la malla resulta esencial para dar la mejor aproximación en los resultados, se observa claramente que a mayor cantidad en el número de nodos y elementos el coeficiente de arrastre comienza a disminuir o aumentar levemente según el prototipo.
- El valor máximo en el número de elementos para el modelo con carenado fue algo más de los once millones, dando como resultado un error de 0.6% entre las dos últimas simulaciones y el valor máximo alcanzado para el modelo sin carenado fue más de seis millones, dando como resultado un error de 0,54% entre las dos últimas simulaciones, por ello el c_d en cada caso es independiente de la malla.
- Aunque generalmente para este tipo de simulaciones se usan modelos de turbulencia que utilicen dos o más ecuaciones de transporte (grupo $k-\omega$, grupo $k-\epsilon$, etc.) el modelo Spalart Allmaras fue diseñado exclusivamente para este tipo de problemas (aerodinámica externa), además por utilizar solo una ecuación de transporte facilita la convergencia en menos tiempo comparado con otros modelos.
- Con una carrocería en fibra de carbono sin carenados podemos obtener una ventaja competitiva de alrededor de 531 m de diferencia respecto a una carrocería en fibra de carbono con carenados.
- A pesar de que el modelo con carenado genera una menor fuerza de arrastre, esto no es suficiente como para vencer la diferencia debido al peso extra generado, por ello pierde eficacia al momento de llegar a la velocidad de punta, respecto a uno sin carenado, por ello recomendamos la implementación de la carrocería **sin carenados** para el diseño de este monoplaza.

16. Bibliografía

Servicio Nacional de Aprendizaje. (2015). *Formula Sena Eco Reglamento técnico Rev 1.3*. Bogotá: SENA.

Anderson, J. M. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. New York: Mc Graw Hill.

Autores. (s.f.). Bogota D.C.

Bhaskaran, R. (s.f.). *edx*. (Cornell University MOOCs) Obtenido de <https://www.edx.org/course/hands-introduction-engineering-cornellx-engr2000x-0>

Carrera, J. M. (21 de Abril de 2009). *Universidad Técnica Federico Santa María*. Obtenido de <http://descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/sub-paginas/Materiales/Ensayotraccion/Image281.gif>

Carro Cepeda, F. H. (2006). *Fluidodinámica Computacional aplicada a vehículos: Estudio de la influencia de las ruedas y los pasos de rueda en la aerodinámica de un automóvil*. Cataluña: Universidad Politecnica de Cataluña.

CASADO Eduarado, G. L. (2009). *Elementos estructurales del vehículo*. Madrid: Paraninfo.

Comite Olimpico Colombiano. (2015). *Comite Olimpico Colombiano*. Obtenido de <http://www.coc.org.co/all-news/formula-sena-eco-se-corre-en-narino-este-sabado-14-de-noviembre>

Cromer, A. H. (s.f.). *Física para las ciencias de la vida*. Reverte.

Delft University. (s.f.). *Introduction to aeronautical engeneering course*.

E. L. Houghton, P. W. (2002). *Aerodynamics for Engineering Students*. Londres: Butterworth Heinemann.

Hallquist, J. O. (1998). *LS-DYNA THEORETICAL MANUAL*. Livermore Software Technology Corporation.

- Jacco M. Hoekstra, J. S. (s.f.). *edx*. (Delft University of Technology (TU Delft) MOOCs)
Obtenido de <https://www.edx.org/course/introduction-aeronautical-engineering-delftx-ae1110x-1>
- Katz, J. (1995). *Racer Car for Aerodynamic Designing*. Massachusetts: Bentley Publishers.
- LS-DYNA Support. (2017). *LS-DYNA Support*. Obtenido de <http://www.dynasupport.com/howtos/general/contact-energy>
- Pinto, G. M. (13 de Abril de 2015). *Diario la República*.
- Rodríguez, J. L. (2013). *Diseño de maquinaria industrial*. Buenos Aires.
- SENA. (2015). *Reglamento técnico de la formula SENA eco V1.3*.
- Smokeonthewater. (2013, Septiembre 10). *Wikimedia Commons*. Retrieved from https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/Spark-Renault_SRT_01_E_%28Formula_E%29.JPG
- Tajadura, R. B. (2005). *Turbulencia*. Oviedo: Universidad de oviedo.
- Talay, T. A. (s.f.). *Introduction to the aerodynamics of flight*. Langley.
- Talay, T. A. (n.d.). *Introduction to the aerodynamics of flighth*. National Aeronautics and Space Administration.
- Tremayne, D. (s.f.). *The science of Formula 1 Design*. J H Haynes & Co Ltd.
- Weeratunge Malalasekera, H. K. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics*. Pearson.
- White, F. M. (2004). *Mecánica de fluidos*. Madrid: Mc Graw Hill / Interamericana de España.
- Yu, D. (s.f.). *Dynamic Responses of PCB Under Product Level Free Drop Impact*.